

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 総合情報学専攻 博士前期課程		
氏 名	高橋 藍	学籍番号	1630072
論文題目	ETS-9投入予定軌道周辺における他衛星・スペースデブリの空間分布及び光学特性		
<p>要 旨</p> <p>情報通信研究機構(NICT)と宇宙航空研究開発機構(JAXA)の開発している次期技術試験衛星(ETS-9)が2021年に静止軌道上に投入される予定である. 本研究では衛星投入位置の安全を確認するため光学観測を実施し, 周辺他衛星・スペースデブリの状況を調査した. 観測は2017年1月にNICT鹿島宇宙技術センターにて口径35cm望遠鏡と冷却CCDカメラを用いて ETS-9の投入予定位置周辺を撮像した. 画像解析の結果, 8個の物体を確認することが出来た. これらを軌道情報カタログと比較したところ, 物体はMTSAT 2, SKYMUSTER 2, BEIDOU G7, unknown 物体, SUPERBIRD 7, CHINASAT 5A, WINDS, APSTAR 9であることが分かった. 次に点像を測光し,それぞれの等級の測定を行い, 太陽, 衛星, 観測地との間の角度phase angleとの関係性を調べた. その結果WINDSにおいてはphase angleに対する等級の変化のループ現象が確認された. これは微小phase angleでの太陽光の当たる向きの変化によるものと考えられる. 測定した等級から検出限界を計算したところ半径0.45mの球程度であることが分かった. さらにWINDSに関しては等級のphase angleによる変化を従来よりも精度よくモデリングすることに成功した. 最後にunknown物体について移動速度から高度を計算したところ, およそ16万kmであることが推測された. 本研究の新規性は天文学で用いる画像処理や評価システムを人工衛星の観測に用いた点, 撮像した衛星の等級についても天文学的手法を用いて定量的に評価した点, WINDSに関してはphase angle に対する光度変化を説明できる高精度なモデルを構築した点である.</p>			

平成 29 年度修士論文

# ETS-9 投入予定軌道周辺における 他衛星・スペースデブリの空間分布及び光学特性

大学院情報理工学研究科  
情報学専攻

学 籍 番 号     : 1630072  
氏       名     : 高橋 藍  
主任指導教員   : 布施 哲治 客員准教授  
指 導 教 員     : 末廣 尚士 教授  
提出年月日     : 平成 3 0 年 1 月 29 日 (月)

# 目 次

第 1 章	序論	12
1.1	研究背景	12
1.2	研究目的	16
1.3	研究概要	19
1.4	論文構成	19
第 2 章	衛星の位置表示	20
2.1	天体に用いる座標系	20
2.1.1	赤道座標系 (赤経, 赤緯座標)	20
2.1.2	地平座標系	21
2.1.3	G 系 (J 系) 地心直交座標系	22
2.1.4	座標変換	24
2.1.5	視差の補正	26
2.2	人工衛星位置の計算	27
2.2.1	人工衛星の位置	27
2.2.2	TLE	29
2.2.3	衛星の位置計算	31
第 3 章	天体の物理特性	33
3.0.1	光学観測	33
3.0.2	等級	34
3.0.3	恒星カタログ	34

3.0.4	人工衛星, スペースデブリの光学特性 . . . . .	35
3.0.5	PhaseAngle . . . . .	35
<b>第 4 章</b>	<b>静止物体の観測</b>	<b>37</b>
4.1	観測システム . . . . .	37
4.2	観測機器 . . . . .	40
4.3	使用ソフトウェア, データ形式 . . . . .	40
4.3.1	FITS . . . . .	40
4.3.2	ds9 . . . . .	42
4.3.3	IRAF . . . . .	43
4.3.4	PyRAF . . . . .	43
4.4	観測手法, 計画 . . . . .	43
4.4.1	観測手法 . . . . .	43
4.4.2	観測範囲 . . . . .	43
4.4.3	観測計画 . . . . .	45
4.5	1 次処理 . . . . .	48
<b>第 5 章</b>	<b>観測結果</b>	<b>50</b>
5.1	観測データ . . . . .	50
5.2	一次処理結果 . . . . .	55
5.3	撮像画像 . . . . .	56
5.3.1	試験観測結果 (撮像時刻 1/18 09:44:02~12:29:47) . . . . .	56
5.3.2	露出時間 10s 観測結果 (撮像時刻 14:24:39~14:39:42) . . . . .	57
5.3.3	露出時間 20s 観測結果 (撮像時刻 15:22:09~15:35:20) . . . . .	58
5.3.4	露出時間 30s 観測結果 (撮像時刻 16:31:00~16:45:12) . . . . .	60
5.3.5	各露出時間での F22 観測結果 (撮像時刻 14:41:12~14:49:57.52) . . . . .	62

<b>第 6 章 解析</b>	<b>63</b>
6.1 各画像における点像	63
6.2 点像スペックの解析	65
6.3 点像の同定	67
6.3.1 点像の位置の計算	68
6.3.2 既知の物体の位置の計算	69
6.3.3 同定	70
6.3.4 撮像衛星の詳細情報	73
6.4 画像の重ね合わせ	77
6.4.1 重ね合わせ結果	77
6.4.2 静止物体位置変動の解析	80
6.5 測光	81
6.5.1 恒星（線像）の測光	82
6.5.2 静止物体（点像）の測光	82
6.5.3 測光結果	83
6.6 等級計算	87
6.6.1 等級計算結果	87
6.6.2 観測限界について	88
6.6.3 等級と時間の関係	90
6.6.4 等級と phase angle の関係	90
6.7 等級の理論値と観測値の差の考察	93
6.7.1 等級理論値との比較	93
6.7.2 等級と大きさ関係に関する考察	94
6.7.3 WINDS の等級に関する考察	97
6.8 unknown 物体について	101

第7章 まとめ	103
参考文献	108
参加研究発表会	114
謝辞	115

# 目 次

1.1	宇宙空間に存在する物体の総数推移 ( [18] より引用) . . . . .	15
1.2	2017/1/19 既知の物体分布図 . . . . .	16
1.3	次期技術試験衛星の特徴 (総務省 宇宙 x ICT に関する懇談会 2017/1/25 より 引用) . . . . .	18
1.4	米国宇宙監視網のカバー範囲 (静止軌道, 仰角 20 度の場合)( [38] より引用) . .	18
2.1	赤緯の表し方 (長山修士論文 (2017)) . . . . .	21
2.2	赤経の表し方 (長山修士論文 (2017)) . . . . .	21
2.3	地平座標系 (長山修士論文 (2017)) . . . . .	22
2.4	地球楕円体と緯度, 経度, 高さの関係 1 . . . . .	23
2.5	地球楕円体と緯度, 経度, 高さの関係 2 . . . . .	23
2.6	赤道座標系と地平座標系 (長山修士論文 (2017)) . . . . .	24
2.7	視差 . . . . .	27
2.8	人工衛星の軌道要素 (長山修士論文 (2017)) . . . . .	28
2.9	TLE (長山修士論文 (2017)) . . . . .	29

2.10	地平座標導出までの流れ . . . . .	32
3.1	phase angle 定義 . . . . .	36
4.1	NICT 鹿島宇宙技術センター . . . . .	38
4.2	鹿島 35cm 望遠鏡 (布施哲治 第 59 回 宇宙科学技術連合講演会 “ NICT 鹿島 35cm 望遠鏡を用 いた低軌道衛の光学観測システム ” より引用) . . . . .	38
4.3	観測システム (布施哲治 第 59 回 宇宙科学技術連合講演会 “ NICT 鹿島 35cm 望遠鏡を用い た低軌道衛の光学観測システム ” より引用) . . . . .	39
4.4	35cm 望遠鏡 . . . . .	40
4.5	ccd カメラ (メーカーホームページより引用) <a href="https://www.bitran.co.jp/ccd/product/bq80/bq82.html">https://www.bitran.co.jp/ccd/product/bq80/bq82.html</a> . . . . .	40
4.6	FITS ヘッダ例 . . . . .	41
4.7	ベテルギウス コントラスト調整前 . . . . .	42
4.8	ベテルギウス コントラスト調整後 . . . . .	42
4.9	観測範囲 . . . . .	44
4.10	JAXA 軌道情報サイト <a href="http://odweb.tksc.jaxa.jp/odds/main.jsp_j.html">http://odweb.tksc.jaxa.jp/odds/main.jsp_j.html</a> 2018/01/11 アクセス . . . . .	45
4.11	1 次処理概念図 . . . . .	49
5.1	1 次処理の結果 . . . . .	55
5.2	試験観画像 (10s) . . . . .	56
5.3	試験観画像 2(50s) . . . . .	56
5.4	試験観画像 3(10s) . . . . .	56
5.5	試験観画像 4(50s) . . . . .	56
5.6	F11(10s) . . . . .	57



5.7	F12(10s)	57
5.8	F13(10s)	57
5.9	F21(10s)	57
5.10	F22(10s)	57
5.11	F23(10s)	57
5.12	F31(10s)	58
5.13	F32(10s)	58
5.14	F33(10s)	58
5.15	F11(20s)	58
5.16	F12(20s)	58
5.17	F13(20s)	59
5.18	F21(20s)	59
5.19	F22(20s)	59
5.20	F23(20s)	59
5.21	F31(20s)	59
5.22	F32(20s)	59
5.23	F33(20s)	60
5.24	F11(30s)	60
5.25	F12(30s)	60
5.26	F13(30s)	60
5.27	F21(30s)	60
5.28	F22(30s)	61
5.29	F23(30s)	61
5.30	F31(30s)	61
5.31	F32(30s)	61
5.32	F33(30s)	61

5.33 F22(1s) . . . . .	62
5.34 F22(5s) . . . . .	62
5.35 F22(40s) . . . . .	62
5.36 F22(50s) . . . . .	62
5.37 F22(60s) . . . . .	62
6.1 試験画像 (50s) 点像 1 . . . . .	63
6.2 試験画像 (50s) 点像 2 . . . . .	63
6.3 F21(10s) 点像 1 . . . . .	63
6.4 F21(10s) 点像 2 . . . . .	63
6.5 F21(10s) 点像 3 . . . . .	64
6.6 F21(10s) 点像 4 . . . . .	64
6.7 F22(10s) 点像 1 . . . . .	64
6.8 F22(10s) 点像 2 . . . . .	64
6.9 F23(10s) 点像 1 . . . . .	64
6.10 imexam により表示された点像スペクトル . . . . .	65
6.11 ステラナビゲータと観測画像の比較 . . . . .	69
6.12 観測画像と TLE から計算した周辺衛星の分布図の比較 1 . . . . .	71
6.13 観測画像と TLE から計算した周辺衛星の分布図の比較 2 . . . . .	72
6.14 MTSAT 2 の外観とスペック . . . . .	74
6.15 SKYMUSTER 2 の外観とスペック . . . . .	74
6.16 BEIDOU G7 の外観とスペック . . . . .	75
6.17 SUPERBIRD 7(C2) の外観とスペック . . . . .	75
6.18 CHINASAT 5A の外観とスペック . . . . .	76
6.19 WINDS の外観とスペック . . . . .	76
6.20 APSTAR 9 の外観とスペック . . . . .	77

6.21 F21 を 5 枚重ね合わせた様子 . . . . .	78
6.22 F22 を 5 枚重ね合わせた様子 . . . . .	78
6.23 F23 を 5 枚重ね合わせた様子 . . . . .	79
6.24 連続撮像した F22 を 5 枚重ね合わせた様子 . . . . .	79
6.25 2017/01/19 WINDS の Elevation 時間変化 . . . . .	80
6.26 phot 測光範囲概念図 . . . . .	83
6.27 MTSAT 2 測光結果 . . . . .	84
6.28 SKYMUSTER 2 測光結果 . . . . .	84
6.29 BEIDOU G7 測光結果 . . . . .	85
6.30 SUPERBIRD 7 測光結果 . . . . .	85
6.31 CHINASAT 5A 測光結果 . . . . .	86
6.32 WINDS 測光結果 . . . . .	86
6.33 APSTAR 9 測光結果 . . . . .	87
6.34 35851.48km にある乱反射球の等級 . . . . .	89
6.35 35851.48km にある板の等級 . . . . .	89
6.36 2017/01/19 BEIDOU G7 phase angle の変化 . . . . .	91
6.37 2017/01/19 SUPERBIRD 7 phase angle の変化 . . . . .	91
6.38 2017/01/19 WINDS phase angle の変化 . . . . .	91
6.39 2017/01/19 CHINASAT 5A phase angle の変化 . . . . .	91
6.40 2017/01/19 APSTAR 9 phase angle の変化 . . . . .	92
6.41 静止衛星の等級と phase angle の関係 . . . . .	92
6.42 静止衛星の等級と phase angle の関係 (ESA 論文より) . . . . .	93
6.43 各フラックス計算値 . . . . .	99
6.44 今回用いた各モデルの形状 . . . . .	100
6.45 WINDS 等級理論値と観測値の比較 . . . . .	100
6.46 unknown 物体の像 . . . . .	101

# 表 目 次

4.1	望遠鏡のスペック . . . . .	40
4.2	カメラのスペック . . . . .	40
4.3	観測計画 . . . . .	45
5.1	観測データ詳細情報 1(2017 年 1 月 18 日) . . . . .	50
5.2	観測データ詳細情報 2(2017 年 1 月 19 日) . . . . .	50
6.1	点像データ詳細情報 1(2017 年 1 月 18 日) . . . . .	65
6.2	点像データ詳細情報 2017 年 1 月 19 日) . . . . .	65
6.3	点像位置計算に用いた恒星と点像の位置 . . . . .	69
6.4	TLE から計算した観測時に観測視野周辺に存在した物体 2017 年 1 月 18 日 . . . . .	70
6.5	TLE から計算した観測時に観測視野周辺に存在した物体 2017 年 1 月 19 日 . . . . .	70
6.6	観測時における TLE 計算値と JAXA サイト計算値 1 . . . . .	73
6.7	観測時における TLE 計算値と JAXA サイト計算値 2 . . . . .	73
6.8	2017/01/18TLE の各衛星軌道傾斜角 . . . . .	81
6.9	標準星測光情報 . . . . .	83
6.10	各物体の等級 . . . . .	88
6.11	限界等級計算結果 . . . . .	89
6.12	等級の時間変化 . . . . .	90
6.13	実際の衛星のサイズと等級から計算した大きさの比較 . . . . .	94

6.14 各衛星の絶対等級 . . . . .	95
6.15 各衛星の重みづけ合計値 . . . . .	96
6.16 設定パラメータ (oceanit 社 [24] を参考) . . . . .	98

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

人工衛星の歴史は 1957 年にソ連が世界初の人工衛星スプートニクを打ち上げた時点から始まる。スプートニクの打ち上げ成功は、宇宙工学分野に大きな進歩を与えただけでなく、政治や国際情勢にも大きな影響を与えた。特に当時、冷戦下であったアメリカは科学技術分野でソ連に後れを取ったという事実から大変大きなショックを受けた。いわゆるスプートニク・ショックと呼ばれる出来事である。その後ソ連に追いつこうとするアメリカとアメリカに対抗するソ連を中心に人工衛星の開発、打ち上げが進んでいった。そして我が国でも 1970 年に日本初の人工衛星”おおすみ”が打ち上げられた。このことで日本はソ連、アメリカ、フランスについて世界で 4 番目に人工衛星を打ち上げた国となった。その後世界中で人工衛星の開発、打ち上げが進んでいき、多種多様なミッションを持ったものが生まれていった。初期の頃は技術的な試験が目的の衛星多かったが、今日では惑星探査など天文学、物理学的調査を目的とした科学衛星、データ転送や放送を目的とした通信、放送衛星、気象調査を目的とした気象衛星、測位を目的とした GPS 衛星など、数多くの人工衛星が打ち上げられている。そして先日には、2016 年の 12 月にソフトバンク株式会社が 12 億円を投資することと決めたアメリカの oneweb 社が 720 機の人工衛星の打ち上げを予定していることを公表した。このように今後も人工衛星の数はますます増加していくことが予想される。

人工衛星の増加により我々の暮らしは豊かになってきたが、それに伴い今まで存在しなかった新たな問題が浮上してきている。それは宇宙空間の混雑問題である。現在宇宙空間に存在する物体の総数は数万に上るとも言われている。図 1.1 はアメリカ軍の調査による、宇宙空間に存在する物体の総数の時間による推移のグラフである。このように人工物体の数は年々右

肩上がりで上昇している。また図 1.2 は 2017/1/31 時点での宇宙空間に存在する人工物体の分布図である。この図から宇宙空間が大変混雑している様子が確認できる。また 2009 年 2 月 10 日には人類史上初めての人工衛星同士の衝突事故が発生している。衝突したのはアメリカの人工衛星イリジウム 33 号とソ連の人工衛星コスモス 2251 である。この事故で両衛星は破壊され、イリジウム側で 620 個、コスモス側で 1667 個の破片が拡散した。これらの破片のようなゴミ、いわゆる ” 宇宙ゴミ ” はスペースデブリと呼ばれている。

人工衛星の打ち上げが進むにつれ、スペースデブリの数も増大していった。スペースデブリは上記の破片のような故障した人工衛星やロケットボディの残骸などの地球を周回している人工物体で、意図する機能やその他の機能が回復する見込みのないものと定義されている。スペースデブリの発生原因としては爆発や衝突事故が 60 パーセントであり、人工衛星やロケットの廃棄が 27 パーセント、放出部品によるものが 7 パーセントとなっている。軌道上に存在する物体の国別の割合についてはロシア 38 パーセント、米国 27 パーセント、中国 26 パーセント、と続き日本は 1 パーセントである。また 2007 年には中国が自国の衛星をミサイルで破壊する実験を行っており、この実験で軌道が特定された物だけでも 3405 個ものスペースデブリが拡散した。

スペースデブリは軌道や姿勢などの制御ができないため、放置され地球の周りを周回し続けているのが現状である。また高度 600km 以上の物体は地球に落下するのに数十年かかり、高度 900km 以上の物体は地球に落下するのに数千年かかる。さらに後述する静止軌道 (高度 36000km) にもなると地球に落下することは永久にない。そのため人工衛星、スペースデブリによる運用中の人工衛星への衝突の危険性が年々高まっており、近年国際的な問題となっている。このまま宇宙空間に存在する物体が増え続ければ、衝突で生じた破片がさらなる衝突を生み、やがて人間の手が付けられなくなる程拡散してしまう、ケスラーシンドロームと呼ばれる現象が起こる可能性があるとも言われている。

このスペースデブリ問題は低軌道の方に注目が行きがちであったが、近年静止軌道上でも無視できない状況となってきた。静止軌道とは赤道上高度約 36000km、公転周期が約 1 日である軌道である。公転周期と地球の自転周期が同じため、この軌道に存在する人工衛星

は地上から見ると上空の1点に静止しているように見える。静止軌道は唯一無二の軌道であるため、世界中の通信、放送衛星などが密集している。静止軌道上では1978年のソビエト連邦の人工衛星EKRAN2の爆発や1992年のアメリカのロケットTitan3Cの爆発、更に去年の6月には静止衛星AMC-9の分裂(原因不明)が起こるなど様々なスペースデブリの拡散事故が発生している。

しかし現在、スペースデブリを軌道上から取り除く技術はまだ確立されていない。JAXA(宇宙航空研究開発機構)やESA(欧州宇宙機関)、NASA(アメリカ航空宇宙局)など世界各国の宇宙機関が、スペースデブリ除去技術についての研究を進めているが、いずれも実用レベルには程遠い状態である。そのためスペースデブリによる衝突事故を防ぐには、どこにどのようなスペースデブリが存在するのかを正確に把握し、人工衛星を回避運用することが非常に重要となる。アメリカではUSSTRATCOM(U.S. strategic command: 米国戦略司令部)と北米大陸を防衛するNORAD(North American Aerospace Defense Command: 北米航空宇宙防衛司令部)が共同でSSN(Space Surveillance Network: 米国宇宙監視網)を運用している。実際に宇宙監視業務を行っているのはUSSTRATCOM内のJFCC SPACE(Joint Functional Component Command for Space: 宇宙統合機能構成部隊)の下位組織であるJSpOC(Joint Space Operations Center: 統合宇宙運用センター)である。こちらは世界30個所にあるレーダー、光学望遠鏡を用いて宇宙空間に存在する物体の監視を行っている。

上記のような状況から日本でも、米国からの要請によりSSAプロジェクト(Space Situational Awareness)が内閣の発表した宇宙基本計画に組み込まれた。SSAプロジェクトとは防衛省やJAXAなどで進められている宇宙空間監視システムの構築と強化を目的としたプロジェクトである。

現在、スペースデブリの位置の把握にはレーダーを用いる手法と光学望遠鏡を用いる手法が存在する。レーダーによる観測は対称物体の位置だけでなく、形状や運動状態を推測することが出来るという特徴がある。しかしレーダー観測に用いる電波は距離の4乗で減衰することが知られているため、高高度(高度5000km以上)を観測する場合には距離の2乗で衰退する光を用いる光学観測の方が優位である。ただし光学観測は天気による制約を受けるとい



う弱点が存在する.

日本では NICT(情報通信研究機構) が古くからスペースデブリの光学観測に関する研究を行っている. 他には JAXA や, 日本スペースガードセンター, ぐんま天文台, 三菱電機株式会社, 株式会社 IHI などがスペースデブリの光学観測技術の開発を行っている.

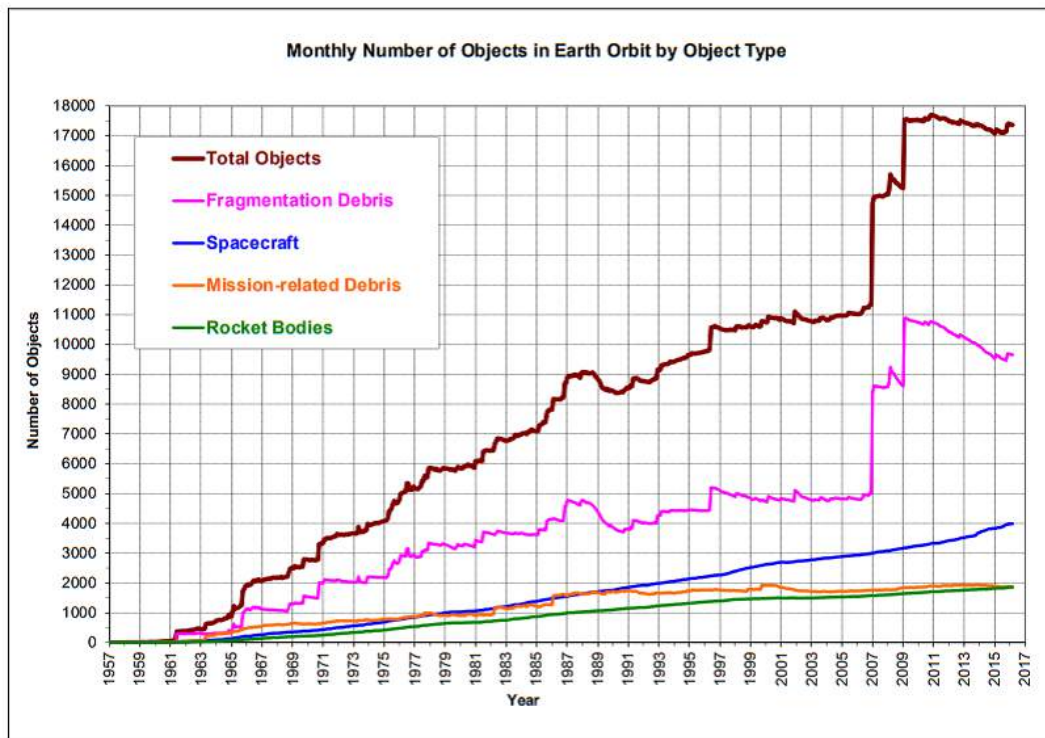


図 1.1: 宇宙空間に存在する物体の総数推移 ( [18] より引用)

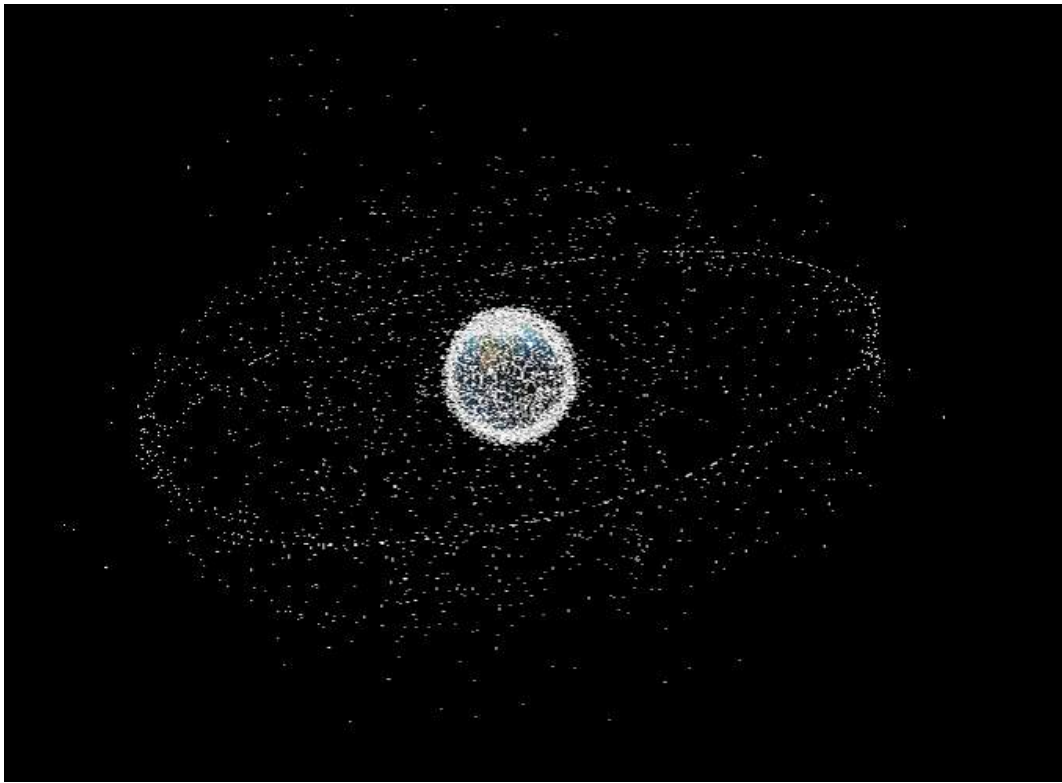


図 1.2: 2017/1/19 既知の物体分布図

## 1.2 研究目的

NICT の開発している高速光通信装置“HICALLI”と電波による通信装置を搭載した次期技術試験衛星 (ETS-9) が 2021 年に打ち上げられ、静止軌道上に投入されることが予定されている。打ち上げ後は、衛星光通信や電波による通信など世界最先端の通信実験が行われる予定である。図 1.3 はその概念図を表している。衛星を安全に運用し、かつ通信実験を安定して実施するためには周辺のお衛星やスペースデブリの分布状況を把握する必要がある。衛星運用者が入手できるお衛星・スペースデブリの軌道情報としてはアメリカ軍が公開している軌道情報カタログが挙げられる。これは先に述べた JSpOC (Joint Space Operations Center) が、世界 30 箇所にあるレーダー、光学望遠鏡を用いて得た地球周回物体の軌道情報を TLE (Two Line Element) というテキストフォーマットで WEB 上に公開しているものである。しかしこの軌道情報カタログは宇宙空間に存在する全ての人工物体を記載しているわけではない。軍

事機密により公開していない物や、能力的に観測できていない物が存在するためである。特に日本上空近く静止軌道上東経  $139^{\circ} 41'$  は仰角  $20^{\circ}$  の場合、米国の監視網ではカバーしきれない領域が存在する (2012 年時点)。仰角  $15^{\circ}$  の場合はハワイやインドの局を用いカバーすることが出来るが、それでも分解能的にやや不利である。図 1.4 に米国の監視網を示す。監視能力としては、低軌道ではレーダー観測で 10cm 以上、静止軌道では光学観測で 1m 以上の物体が観測可能だと言われている。これは一般に表現されている検出限界と同水準である。(ただし JAXA の研究では光学観測画像にデータ処理を施し、静止軌道上で cm 級の物体を観測した事例も存在する) また TLE は衛星の位置に 1~2km ほどの誤差を含んでいることが知られている。以上のような状況から、実際その他衛星・スペースデブリの分布状況を知るためには自力で観測を行う必要がある。

また光学観測では画像解析により、対称物体の位置以外の物理情報についても推定することができる、観測対象の大きさや運動状態、表面特性などである。しかしこれらの物理情報は、影響を及ぼす要因の数がとても多く複雑であり、現状では完全にモデル化することが出来ない。そのため人工衛星やスペースデブリの光学特性に関するデータを収集することは非常に重要となる、これらの物理特性を高い精度でモデリングすることで、未知のスペースデブリの解析などに応用することが可能になるためである。そこで本研究では、ETS-9 投入予定軌道周辺の光学観測を実施し、周辺物体の分布状況及び物理特性が、現状でどのような状況になっているかを調査することを目的とした。

既存の衛星通信での課題解決に必要な技術開発を実施し、非常時、海洋、航空を含む宇宙空間に100Mbps級のブロードバンド通信を可能とする衛星通信システムの技術実証と競争力の確保を目指す

平成33年の打上げを目指し、総務省、文科省、NICT、JAXAがプロジェクトに着手

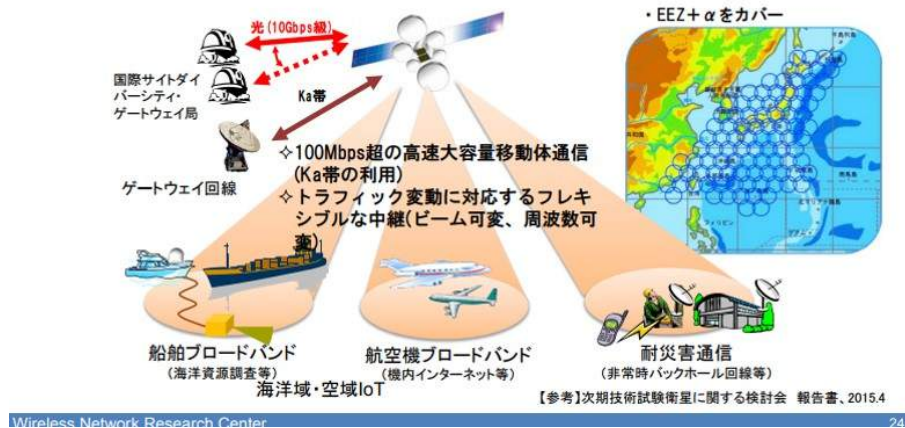


図 1.3: 次期技術試験衛星の特徴 (総務省 宇宙 x ICT に関する懇談会 2017/1/25 より引用)

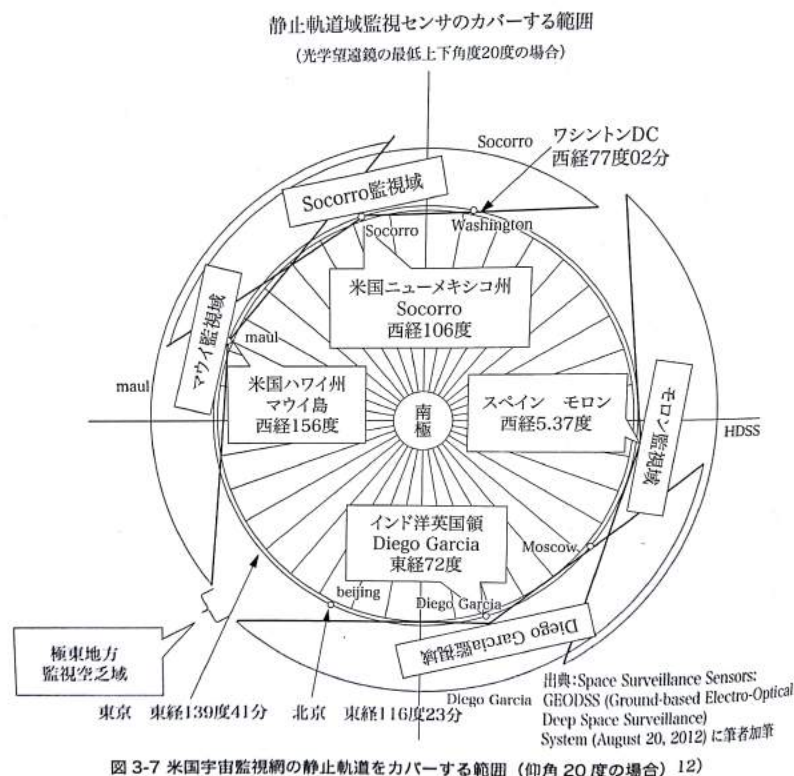


図 1.4: 米国宇宙監視網のカバー範囲 (静止軌道, 仰角 20 度の場合)( [38] より引用)

## 1.3 研究概要

本研究の観測は対象が静止軌道上となるためレーダーではなく光学望遠鏡を用いて行う。観測装置は国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) 鹿島宇宙技術センターに設置されている口径 35cm 望遠鏡と冷却 CCD カメラを使用した。夜中に次期技術試験衛星投入予定位置に望遠鏡を向け、静止軌道上の物体によって反射された太陽光を冷却 CCD カメラで撮像する。撮像画像に天文学の世界で用いられるノイズ処理などを施し、物体の探索を行う。その後、TLE を用いて撮像された静止物体が既知のものであるのか、どのようなものであるのかを調査する。さらに背景の恒星との相対的な位置関係から静止物体の位置の決定を行い、次期技術試験衛星投入予定位置周辺の分布状況を把握する。また静止物体の光学特性に関する解析例はあまり多くないため、撮像画像から光学特性の調査を行う、具体的には物理情報として等級を用いた解析を行う。このような解析から、将来スペースデブリや未知物体の解析に役立つようなデータの取得を目指す。

## 1.4 論文構成

第 2 章では人工衛星の位置の表し方や計算方法について述べる。人工衛星や天体は 3 次元直交座標よりも天文学特有の座標系で位置を表すことが多いため、それぞれについて解説する。そして第三章では光学観測について、衛星の光学特性についての理論式を解説する。第四章で今回用いた観測手法、システムについて説明し、第五章で観測結果、第六章で位置に関する解析と等級に関する解析結果の 2 つについて述べる。解析には様々な画像処理を施しているため、それぞれの手法についても解説する。最後に、第七章でまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 衛星の位置表示

### 2.1 天体に用いる座標系

人工衛星や天体の位置の表現には適当な座標系を設定することが非常に重要となる。もちろん宇宙空間は3次元空間であるため、単純に3次元直交座標を用いることもできるが、地上からの観測を想定すると、距離よりも方角の方が位置を表すのにより重要な要素となる。そのため天体の位置は距離を含まず角度で表すケースが非常に多い。本研究でも角度によって位置を示す座標系である赤道座標系、地平座標系、G系地心直交座標系などを用いる。以下にそれぞれの座標系について述べる。

#### 2.1.1 赤道座標系 (赤経, 赤緯座標)

恒星は東に上り、西に沈む日周運動をしており、相互の位置関係はほとんど変わらない特徴を持つ。このような恒星の位置を表すため恒星の位置がいつでも同じ数値であるように考えられた座標系が赤道座標系である。赤道座標系は赤緯と赤経という二つの角度で天球上の位置を示す。図 2.1, 図 2.2 は赤経と赤緯の表し方を示している。赤道座標系では図のように地球を取り巻く非常に大きな球面、天球を用いて位置を表す。この天球の中心は地球の中心と一致しているものとする。また地球の自転軸は、北極と南極を貫く直線であり、その延長と天球の交点が天の北極 (北)、天の南極 (南) である。この自転軸と直交する地球の赤道を通る平面と天球との交線を天の赤道という。この天の赤道を基準として図のように天球上の点の赤緯を決める。天の赤道は赤緯が  $0^\circ$  の線であり、北に向け  $+90^\circ$  まで、南に向け  $-90^\circ$  まで刻むことが出来る。つまり天の赤道よりも北では赤緯は正の値となり、天の赤道よりも南では赤緯は負の値となる。次に赤経の決定であるがこちらは基準点に春分点と呼ばれる点を用いる。

春分点は黄道と天の赤道の交点で南から北へ太陽が移動する方の点と定義されている。春分点と天の北極、天の南極を通る大円が赤経 0h の線として決まり、そこから東側へ目盛りを刻んで図のように 0h から 24h までを表す。このような座標の取り方により、赤経と赤緯を与えることで、天球上の 1 点が決まる。また赤経では h(時), m(分), s(秒), 赤緯では  $^{\circ}$  (度),  $'$  (分),  $''$  (秒) という単位が用いられる。

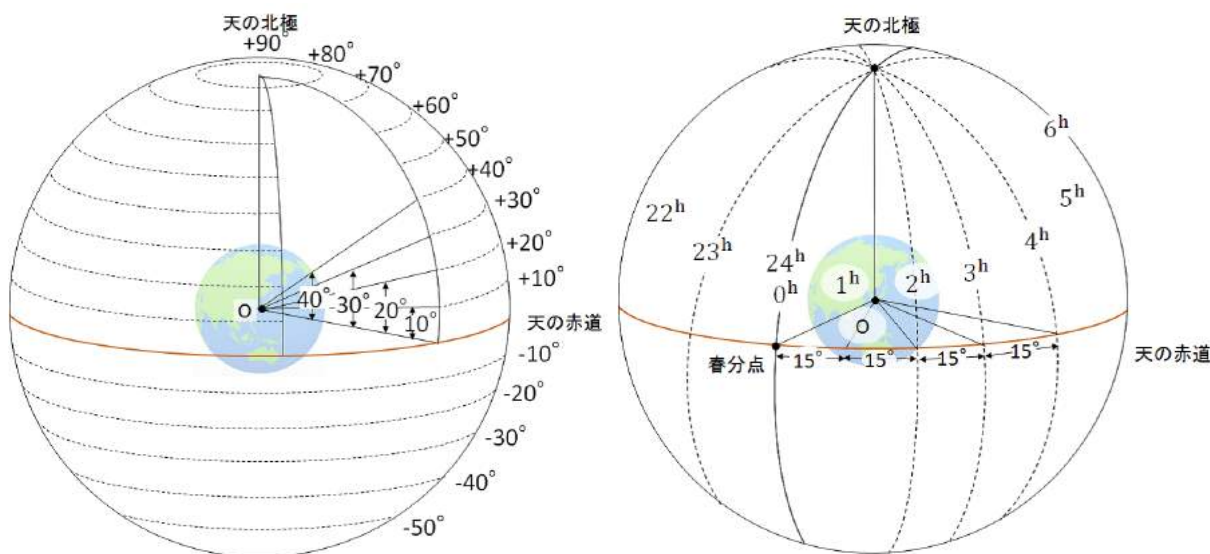


図 2.1: 赤緯の表し方(長山修士論文 (2017)) 図 2.2: 赤経の表し方(長山修士論文 (2017))

## 2.1.2 地平座標系

実際に地上から天体を見た時にどこに見えるかを示すのに用いられるのが地平座標系である。こちらの座標系では図 2.3 のように観測者のいる点を  $O$  とし、 $O$  を中心とした天球を考える。この天球のうち実際に見えるのは上半分のみである。地平面は凹凸のない理想的な水平面として考える。つまり地平面は天頂と天底を結ぶ線と直交している。また地平面と天球が交わる円を地平線とする。この時、地平線上の北の点、天頂、地平線上南の点、天底を通る大円を子午線とする。位置を表したい天体が点  $X$  にあるとき、天頂と天体  $X$  を通る大円が地平線と垂直に交わる点を  $H$  とする。この時  $\angle SOH$  を天体の方位角 (Azimuth),  $\angle HOX$  を天体の高度 (Elevation) という。方位角は南を  $0^{\circ}$  とし、そこから西、北、東、と進む方向に数値



が大きくなり 1 周した点で  $360^{\circ}$  となる。高度は地平線を基準点、つまり  $0^{\circ}$  とし、上向きに  $90^{\circ}$  までの数値で表す。

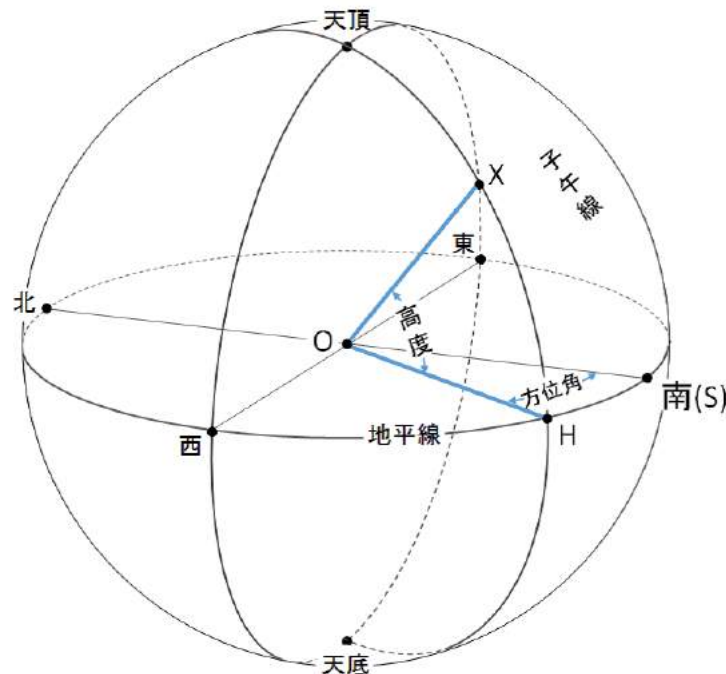


図 2.3: 地平座標系(長山修士論文 (2017))

### 2.1.3 G 系 (J 系) 地心直交座標系

恒星や惑星、彗星の場合は距離が遠いため、観測者が地球上のどこにいても赤経、赤緯に差はほとんど出てこない。しかし人工衛星やスペースデブリなどの比較的距離が近い天体の位置を考える場合には、観測点の位置を正しく表すことが必要となる。このような時に用いられるのが G 系 (J 系) 地心直交座標系である。G 系地心直交座標系、J 系地心直交座標系は赤道座標系とは異なりどちらも地球に固定した座標系であり、経度、緯度、高さで位置を表す。これらの座標系では図 2.4, 図 2.5 のような地球楕円体 (ベッセルの楕円体) を考える。地球は完全な球体ではなく、正確には図のような楕円体であることが知られているためである。まず図 2.4 のような楕円体について考える。楕円体の中心を O とし、AOA' は赤道面を表している。位置を表したい天体 X がいる時、X の楕円面に対する法線が楕円面と交わる点を H、赤



道面と交わる点を J, 極軸と交わる点を K とする. この時  $\angle AJX$  が点 X の緯度である. 緯度は天体が赤道面よりも北にある場合正の値, 赤道面よりも南にある場合負の値をとるものとする. また距離 HX が天体 X の距離となる. この時, 距離 KH, つまり N は東西線曲率半径と呼ばれる.

次に図 2.5 のような楕円体を考える. この時, ある基準点 G のある子午面と X のある子午面のなす角度が X の経度  $\lambda$  となる. 本論文では G を通る子午線をグリニッジ子午線として考える. 経度は図で示した向きで図る場合は東経で, 反対向きに図った場合は西経となる.

上記で示した座標系の中心は地球楕円体の中心を示している. この時この座標系を J 系座標系という. ここでの緯度, 経度は地図上の緯度, 経度と一致する. 一方 G 系座標系とは J 系座標系を平行移動し, 中心位置を地球の重心と一致させたものである. 人口衛星やスペースデブリは, 地球の重心を中心とした運動を行うため, 見える位置を考える場合はこちらの座標系の方が都合がよい.

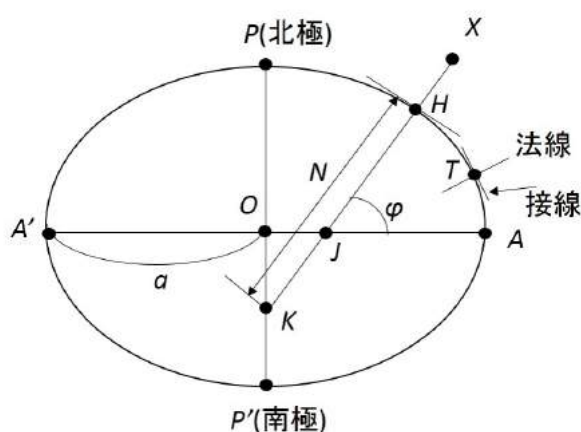


図 2.4: 地球楕円体と緯度, 経度, 高さの関係

1

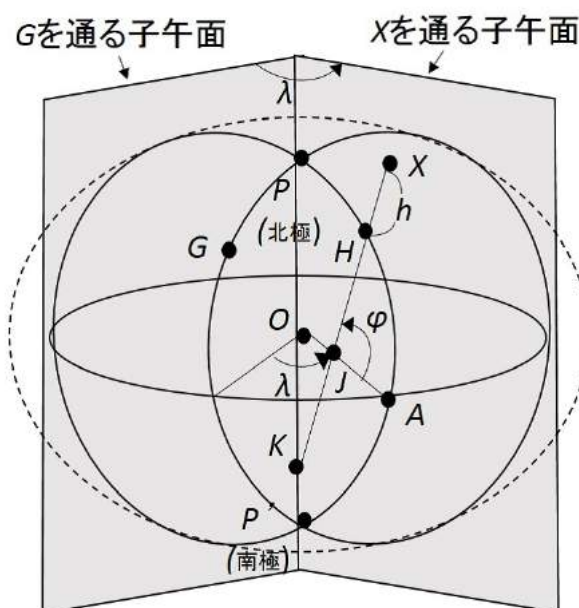


図 2.5: 地球楕円体と緯度, 経度, 高さの関係

2

## 2.1.4 座標変換

赤道座標  $(\alpha, \Delta)$  を地平座標  $(A, h)$  へ変換することを考える．まず図 2.6 は地平座標と赤道座標を重ねた様子を示しており，観測者が北半球にいる様子を仮定している．天の北極  $P$ ，天の南極  $P'$  は地平座標での子午線上にあり，天の北極の高度が観測地点の緯度と等しくなる．天の赤道上に存在する春分点  $\gamma$  は日周運動によって動くため，時刻によって位置が変わる．春分点の位置は  $\angle ZP\gamma = \Theta$  によって示される．この角度  $\Theta$  恒星時と呼ぶ．恒星時は時刻によって変化する量である．

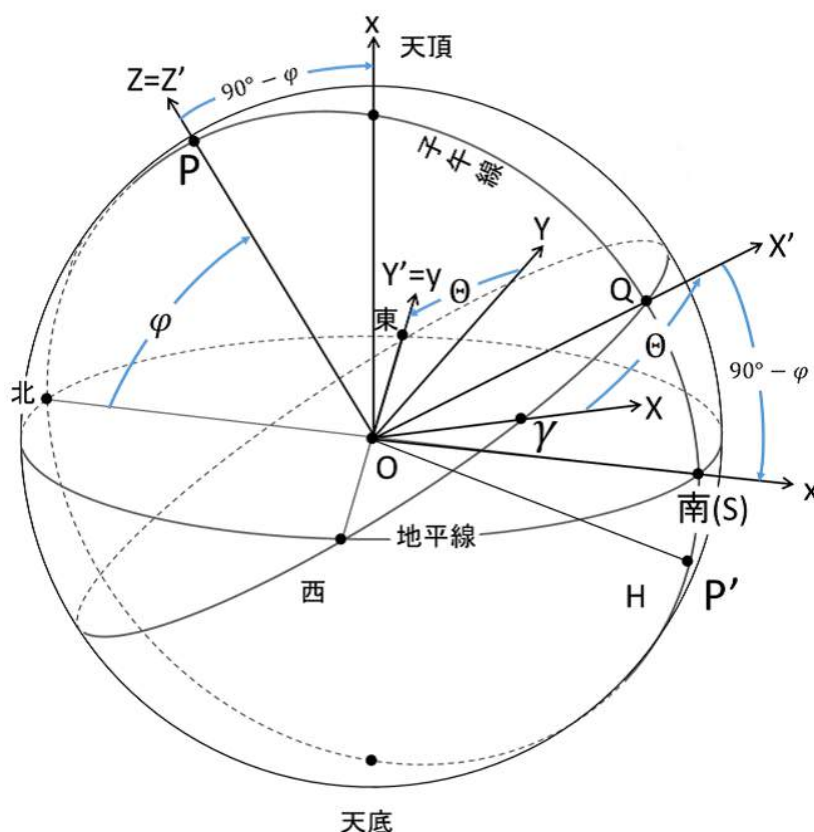


図 2.6: 赤道座標系と地平座標系(長山修士論文 (2017))

この二つの座標系は二回の座標変換で結びつけることが出来る．まず初めに赤道座標系を， $Z$  軸を軸として正の向きからみては時計回りに  $\Theta$  だけ回転した座標系  $X'Y'Z'$  について考える．すると  $X'$  軸は子午線上に， $Y'$  軸は地平線上にくる．初めの座標系で示されていた天体の位置を表す方向余弦  $(L, M, N)$  をこの  $X'Y'Z'$  座標系による方向余弦  $(L' M' N')$  で

示すと以下のようになる.

$$\begin{pmatrix} L' \\ M' \\ N' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

次に  $X' Y' Z'$  座標系を,  $Y'$  軸を軸として正の向きからみて反時計回りに  $(90^\circ - \varphi)$  回転した座標系について考える. この座標系がまさに地平座標となる. この時の変換行列は下記のようになる.

$$\begin{pmatrix} \cos(90^\circ - \varphi) & 0 & -\sin(90^\circ - \varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90^\circ - \varphi) & 0 & \cos(90^\circ - \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

したがって地平座標における方向余弦  $(l, m, n)$  は

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L' \\ M' \\ N' \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

となる. そして方向余弦に簡単な三角関数の計算を行うことで二つの角度に変換することが出来る. よって

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(\Theta - \alpha) \quad (2.4)$$

$$\cos h \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos(\Theta - \alpha) \quad (2.5)$$

$$\cos h \sin A = \cos \delta \sin(\Theta - \alpha) \quad (2.6)$$

となる．地平座標から赤道座標への変換は上記の逆行列を用いることで変換することが出来る．

### 2.1.5 視差の補正

上記の座標変換は回転行列を用いた変換のみで構成されている．しかし赤道座標の中心点は地球の中心であり，地平座標の中心は観測者（観測地点）である．そのため本来は中心位置の違いも考慮しなければならない．恒星の位置計算の場合は地球から恒星までの距離が極めて遠いため，中心位置の違いを無視することができるが，人工衛星やスペースデブリの場合は考慮する必要がある．

一般に，地表の観測者から見た天体の位置と地球の中心から天体を見た位置のずれは視差と呼ばれている．この視差の様子を示しているのが図 2.7 である．ここでまず天体の中心  $S$  と地心  $C$  及び観測者  $O$  を結んでできる三角形について考える．天頂の方向は  $OZ$  である．天体  $S$  の地心における Elevation を  $\zeta$  とし，観測地における Elevation を  $\zeta'$  とすると，

$$\zeta = \zeta' + \theta \quad (2.7)$$

$$\therefore \theta = \zeta' - \zeta \quad (2.8)$$

となる．この時の  $\theta$  が視差となる．また観測地の地心距離を  $R$ ，天体の地心距離を  $\Delta$  とすると，

$$\frac{\Delta}{\sin(180^\circ - \zeta')} = \frac{R}{\sin \theta} = \frac{\Delta'}{\sin \zeta'} \quad (2.9)$$

これより

$$\sin \theta = \frac{R}{\Delta} \sin \zeta' \quad (2.10)$$

となり視差を計算することが出来る．本研究では静止軌道上を観測対象としているため，地心距離を静止軌道上と仮定し，視差計算を行った．

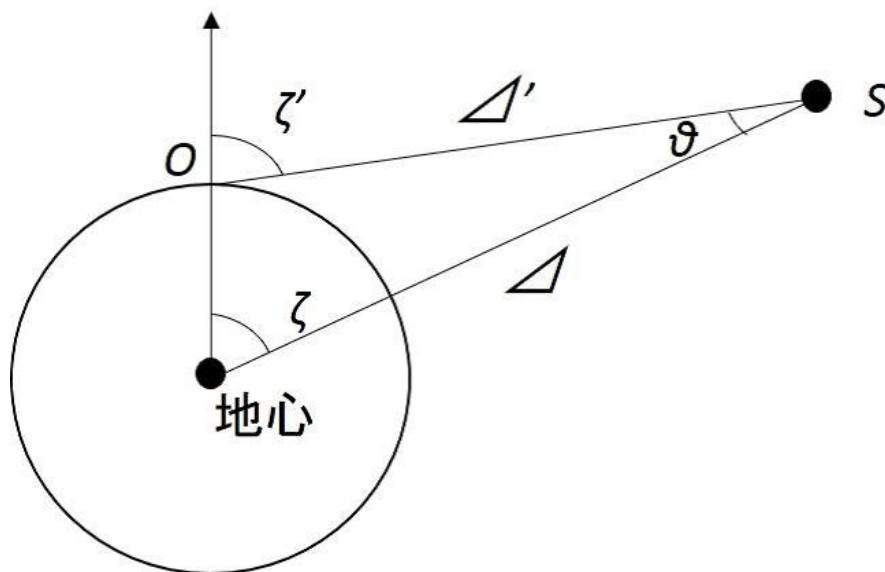


図 2.7: 視差

## 2.2 人工衛星位置の計算

ここでは人工衛星の位置計算に必要な要素について紹介する.

### 2.2.1 人工衛星の位置

人工衛星やスペースデブリは太陽系天体が太陽の周りを周るのと同じように, 地球の周りを 2 体問題のように楕円軌道を描いて運動していると考えることができる. すると人工衛星, スペースデブリの軌道は自然天体と同じように軌道要素という 6 つのパラメータで表すことができる. まず図 2.8 のように赤道面と人工衛星の軌道面が地球の重心  $C$  を通る直線  $NCN'$  で交わるとする. 人工衛星が南から北へ, 赤道面を横切る点 (昇交点) が  $N$  だとすると, 春分点から赤道面に沿って東向きに測った  $\angle \gamma CN$  が昇交点赤経 ( $\Omega$ ) となる. 起動平面と赤道面のなす角は軌道傾斜角 ( $i$ ) と呼ばれる. また人工衛星が最も地球重心に近づく点  $A$  が近地点であり,  $\angle NCA$  は近地点引数 ( $\omega$ ) と呼ばれる. 最後に近地点から人工衛星のいる位置まで軌道に沿って測った角度が真近点角 ( $v$ ) と呼ばれている. これに楕円軌道の離心率 ( $e$ ) と軌道長半

径 ( $a$ ) を加えた 6 つのパラメータが軌道の 6 要素である.

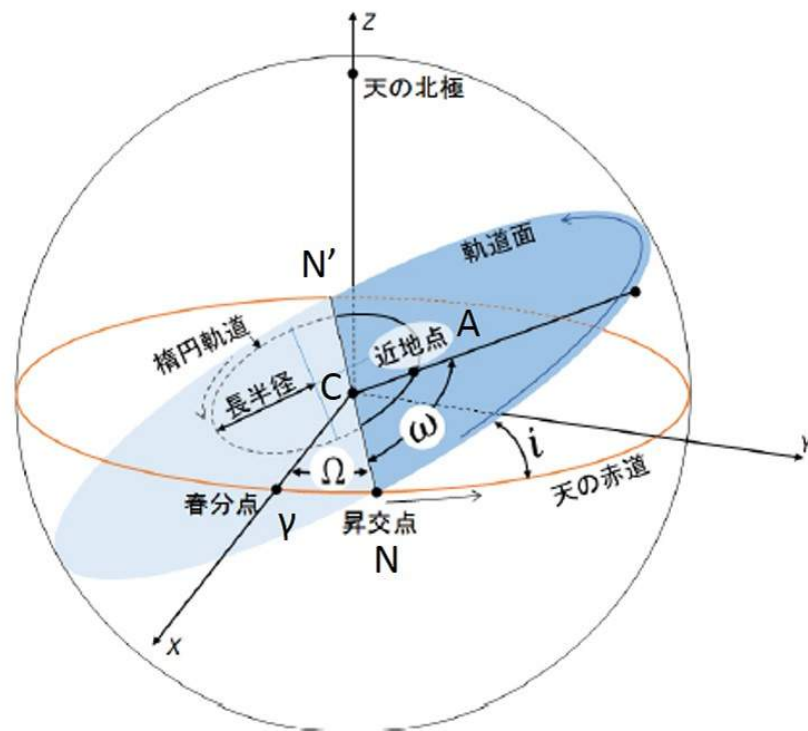


図 2.5: 人工衛星の軌道要素

図 2.8: 人工衛星の軌道要素(長山修士論文(2017))

人工衛星やスペースデブリの場合、摂動と呼ばれる様々な外的な力に影響され、軌道要素の値は時間とともに変動する。摂動の要因には地球の形の歪さによるもの、大気の影響、太陽や月の引力による影響、などがある。また摂動には短周期で影響を与えるもの、長周期で影響を与えるもの、永年的に影響を与えるものの3種類に分けることが出来る。そこである瞬間にだけ成り立つ軌道要素を接触軌道要素といい、短周期の摂動の影響を取り除いた軌道要素を平均軌道要素という。

## 2.2.2 TLE

TLE(Two Line Elements : 二行軌道要素形式) は 1 章で述べた JSpOC(Joint Space Operations Center: 統合宇宙運用センター) が提供している, 軌道上に存在する物体の名称, 各種識別番号, 軌道要素などが 2 行で記録されているテキスト形式のデータである. この TLE を用いることで衛星の位置を計算することが出来る. 有名な軌道計算アルゴリズムとしては SGP4 と呼ばれるものがある. TLE は日々更新されており, 衛星の正確な位置を計算するためには最新の TLE を用いることが重要となる.

		衛星名	国際識別番号	元期	平均運動の1次微分・2時微分		抗力項	軌道モデル	連番		
行番号		SOCRATES									
	1	39768U	14029C	16353.83901045	.00000125	00000-0	21429-4	0	999	7	チェックサム
	2	39768	97.8696	87.3810	0006653	185.1920	174.9223	14.83994127	13928	2	
		衛星カタログ番号	軌道傾斜角	昇交点赤経	離心率	近地点離角	平均点近角	平均運動	通算周回数		

図 2.9: TLE(長山修士論文(2017))

### 一般名

衛星の名前である. スペースデブリの場合は名前の後ろに DEB という文字が付く.

### 国際識別番号

打ち上げ順に付けられた番号である. 最初の 2 桁は打ち上げ年, 次の 3 桁が打ち上げ順を表している.

### 元期

起動要素決定日時を表している. 最初の 2 桁が年であり, 次の 3 桁がその年の 1 月 1 日 0:00(UTC) からの経過日数である.

## 平均運動の1次/2次微分

空気抵抗を表す項. 現在は使われていない.

## 抗力項

空気抵抗を表す項. こちらは現在も使われている. 宇宙空間であっても高度数百 km 程度では空気抵抗により衛星の高度が著しく下がっていく.

## 軌道モデル

元々は用いるべき軌道計算アルゴリズムを示していたが現在は使われていない.

## 通番

軌道要素の更新回数を表している.

## 軌道傾斜角

赤道を基準とした衛星の軌道面の傾きを表す. 単位は度である.

## 昇交点赤経

先に述べた昇交点赤経である. 単位は度であり, 軌道面と赤道面が一致する場合は定義が出来ないので0となる.

## 離心率

衛星がたどる楕円軌道の離心率である. 数字の先頭に”0.”が付いた数字が離心率となる. 離心率は0に近い楕円に近くなる.



## 近地点引数

先に述べた近地点と昇交点の間の角度である。

## 平均近点角

衛星が近地点からどのくらい離れているかを示す角度である。単位は度である。これは天体の楕円軌道と長半径が一致した円軌道を等速で運動している天体が存在すると仮定した時に、円軌道の中心から見て、この仮想天体が元期にいる点と近日点のなす角度と定義される。

## 平均運動

衛星が1日に何周するのかを示した量である。

## 通算周回数

衛星が打ち上げられてから元期までに軌道を周回した回数を示す。

### 2.2.3 衛星の位置計算

軌道要素から地平座標での衛星の位置計算の流れを以下に示す。

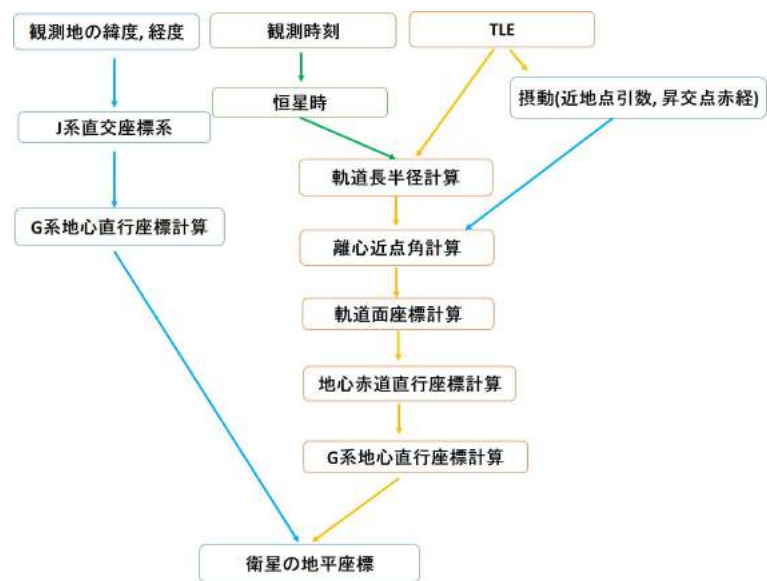


図 2.10: 地平座標導出までの流れ

## 第3章 天体の物理特性

### 3.0.1 光学観測

光学観測とは天体や銀河などの観測手法のうち、主に可視光などを用いた観測手法のことである。本研究で行われた観測は全てこの光学観測である。具体的には光学望遠鏡を用いて太陽光の反射光を利用し、対称物体を観測する手法を用いた。光学観測は古くから用いられている天体観測の手法の一つであるが、地球の大気による影響を受ける特徴がある。そのひとつが星の瞬き（シンチレーション）である。これは大気によって星像が揺らぐ現象である。このシンチレーションの度合いを表す尺度のひとつにシーイングと呼ばれるものがある。通常星像はガウス分布を回転させた立体的な分布で近似される。このガウス分布の半値幅がシーイングの定義となる。シーイングの値が大きいほど、シンチレーションが大きくなり、星像は広がりぼやけてしまう。

近年の光学観測では、光学望遠鏡に冷却 CCD カメラを取り付け、観測視野を画像として撮像するのが一般的である。冷却 CCD カメラとはその名の通り冷却しながら使用する CCD カメラのことである。一般に天体の観測では CCD カメラの露光時間を数秒などに設定し撮像を行うことが多い。露光時間が長ければ長い程、CCD 素子に到達するフォトンが増加し暗い天体も撮像することが出来るためである。しかし露光時間を長くすると、CCD カメラ特有の暗電流と呼ばれる電流によるノイズが発生してしまう。この暗電流は CCD 素子に光が当たっていなくても発生してしまう電流で温度によってその大きさが変化することが知られている。そのため CCD カメラを可能な限り冷却することでノイズを減らす。冷却方法としては液体窒素を用いる方法と、ペルチェ素子を用いる方法が一般的である。

### 3.0.2 等級

天文学の世界では星の明るさを表す指標として、古代ギリシャの天文学者ピッパルコスにより提案された等級を用いる。等級の値はより明るい天体ほど大きくなり、1等よりも明るい星は0や負の値を用いて表す。等級の値は19世紀にイギリスの天文学者ノーマン・ロバート・ポグソンにより1等星が6等星の100倍明るくなるように定義された。これにより、等級を整数だけでなく小数でもあらわすことが可能になった。ポグソンにより定義された等級の関係式を以下に示す。

$$m - m_0 = -2.5 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (3.1)$$

$m$ :星1の等級,  $m_0$ :星2の等級,  $I$ :星1の明るさ(フラックス),  $I_0$ :星2の明るさ(フラックス)

以上の等級値は地球から見たときの明るさいわゆる”見かけの等級”である。等級には地球からの距離によらない明るさを表す指標として、絶対等級と言う指標も存在する。絶対等級は扱う対象によって定義が変わるが、一般的に用いられる定義は天体を10pc(パーセク)の距離から見たときの明るさとされている。1パーセクとはおよそ3.26年、つまり30兆km程度である。本研究では特に断りのない限り見かけの等級を等級値として用いている。

### 3.0.3 恒星カタログ

恒星カタログとは恒星の位置、等級、視差、スペクトル型などを記載した天体情報目録である。本研究ではUSNO-A2.0星表とティコ第二星表(Tycho-2)を用いた。USNO-A2.0星表はパロマー天文台やヨーロッパ南天天文台などのサーベイ画像を米軍海軍天文台が整役したカタログである。ティコ第二星表はESA(欧州宇宙機関)のピッパルコス衛星によって観測されたデータによって構成されているカタログである。

#### ステラナビゲータ

ステラナビゲータは天文シミュレーションソフトウェアで、多数の恒星カタログを収録しており任意の時刻、地点での星空を再現することが出来る。さらにCCDカメラの露出時間、

視野角を入力することで、任意の視野についての CCD カメラでの撮像画像も再現することが出来る。また、指定した恒星の等級、赤径、赤緯、Az、El を調べることが出来る。本研究ではこちらのソフトウェアを使用することで恒星の情報を調査した。

### 3.0.4 人工衛星、スペースデブリの光学特性

光学観測というと恒星や惑星の観測というイメージが強いが、人工衛星やスペースデブリにも応用することが可能である。但し人工衛星やスペースデブリは恒星に比べ明るさが暗く、また動きも早いものが多いため、口径が大きく、追尾精度の高い観測設備が要求される。人工衛星の光学望遠鏡による観測は 1960 年代からアメリカで試みられていた。McCue ら [7] によると一般に物体の等級は以下のように表すことが出来る。

$$m = -26.58 - 2.5 \log \left( \frac{A \gamma F(\phi)}{R^2} \right) \quad (3.2)$$

ここで  $A$  は物体の断面積、 $\gamma$  は反射率、 $F(\phi)$  は phase angle  $\phi$  を引数に持つ関数である。この  $F(\phi)$  は物体の形状や向きによって決まる。また物体の反射特性は鏡面反射と乱反射の二つのパターンが考えられる。乱反射のモデルではランバート反射が用いられている。乱反射球の場合の  $F(\phi)$  は

$$\frac{2}{3\pi} (\sin(\phi) + (\pi - \phi) \cos(\phi)) \quad (3.3)$$

, 乱反射板の場合は

$$\frac{1}{\pi} \cdot \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.4)$$

となる。

### 3.0.5 PhaseAngle

phase angle とは太陽、観測地、衛星の間の角度である (図 3.1)。phase angle はアメリカ空軍の論文 [26] により以下の式で定義されている。この角度が小さくなればなるほど衛星の明

るさは増していく．そのため本研究では暗い天体も十分撮像できるように phase angle の比較的小さくなる深夜帯を観測時刻とした．

$$\eta_{phase} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{r}_{LOS} \cdot (\vec{r}_{Sun} - \vec{r}_{sat})}{|\vec{r}_{LOS}| |\vec{r}_{Sun} - \vec{r}_{sat}|} \right) \quad (3.5)$$

ここで  $\vec{r}_{Sun}$  は地心から見た太陽の位置ベクトルであり， $\vec{r}_{sat}$  は地心から見た衛星の位置ベクトル， $\vec{r}_{site}$  は地心から見た観測地の位置ベクトル， $\vec{r}_{LOS}$  は， $\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{site}$  で表される．

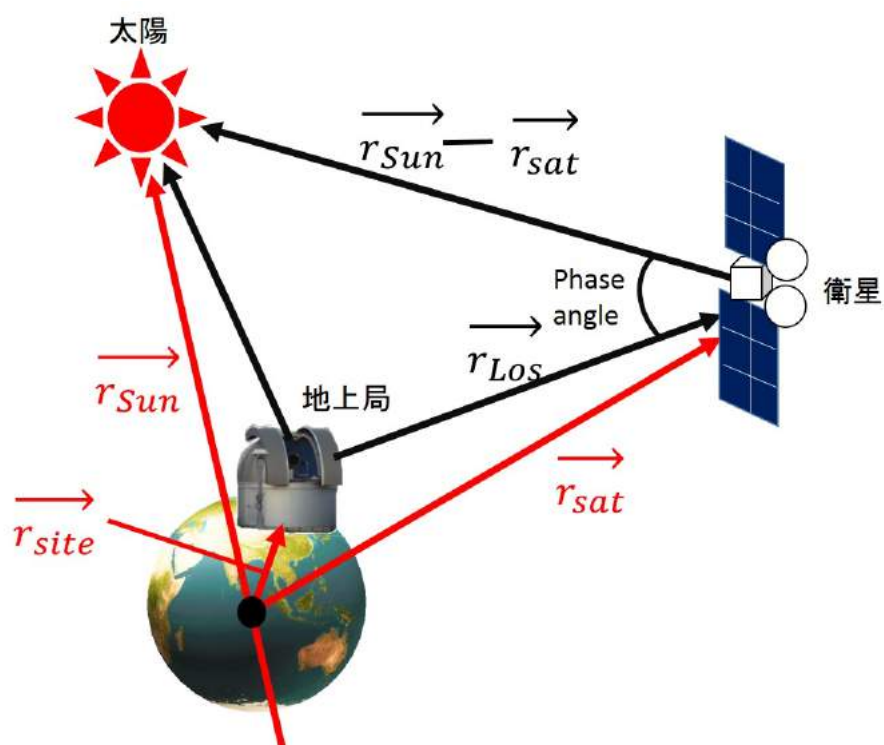


図 3.1: phase angle 定義

## 第4章 静止物体の観測

### 4.1 観測システム

観測は茨城県鹿嶋市にある NICT 鹿島宇宙技術センターにて行った。図 4.1 に鹿島宇宙センターを示す。こちらの施設ではパラボラアンテナや監視、通信用光学望遠鏡など、宇宙通信分野の研究に用いられる設備が数々設置されている。その中でも本研究では研究本館の屋上に設置されている口径 35cm 光学望遠鏡を用いた。図 4.2 にこちらの望遠鏡の外観を示す。望遠鏡はドームに覆われており、雨風をしのげるようになっている。またこの望遠鏡には冷却 CCD カメラが取り付けられており、観測している視野を画像として撮像、記録することが可能である。さらにドーム内には種々の計算機が設置されており、望遠鏡の方向制御、CCD カメラの制御、ドームの制御などを全てドーム内の PC で管理することが可能となっている。図 4.3 に観測システムの外観を示す。尚この望遠鏡システムでは 2 章で述べた Azimuth が北を 0 度とし、その後東、南、西の方向に刻んでいくように定義されている。天文分野では Azimuth について南を 0 度とし、その後西、北、南の方向に刻んでいく定義も存在するので注意が必要である。望遠鏡の緯度は 35.95 度、経度は 140.66 度、高度は 25m である。

また本館屋上には NICT が開発した光通信実験用の天候監視装置が設置されており、雲量、雲高、風向き、風量などが 1 分単位で記録、保管されている。本研究ではこちらのシステムを用いて観測の可否の判断、観測時の環境状況の調査を行った。

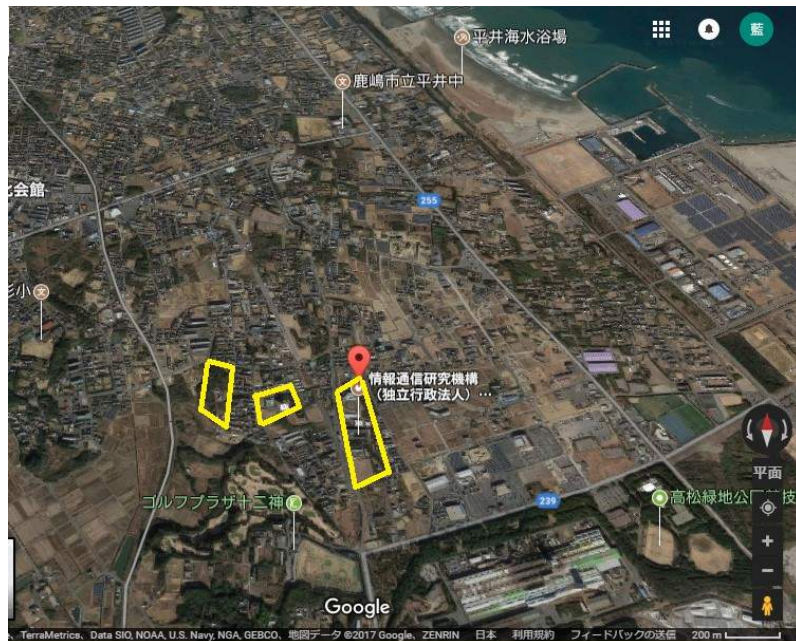


図 4.1: NICT 鹿島宇宙技術センター



図 4.2: 鹿島 35cm 望遠鏡

(布施哲治 第 59 回 宇宙科学技術連合講演会 “NICT 鹿島 35cm 望遠鏡を用いた低軌道衛星の光学観測システム” より引用)



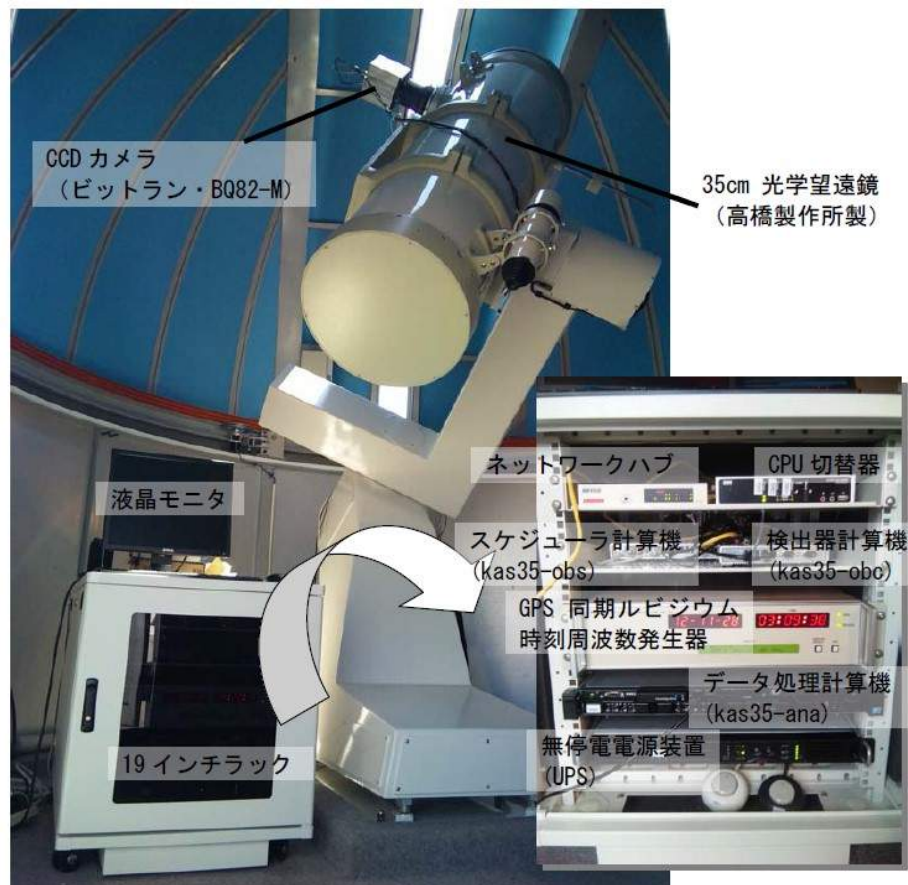


図 4.3: 観測システム

(布施哲治 第 59 回 宇宙科学技術連合講演会 “NICT 鹿島 35cm 望遠鏡を用いた低軌道衛の光学観測システム” より引用)

## 4.2 観測機器

本研究では前述のように口径 35cm 光学望遠鏡と冷却 CCD カメラを用いた。以下にそれぞれの機器のスペックを示す。



図 4.4: 35cm 望遠鏡

表 4.1: 望遠鏡のスペック

機種	タカハシ $\epsilon$ -350 (F3.6)
架台・制御系	西村製作所製
口径	36cm
焦点距離	1248mm
F 値	3.6



表 4.2: カメラのスペック

機種	BITRAN BQ-82
画素数	$4,872 \times 3,248$ pix
視野	$1.1^\circ \times 1.6^\circ$
冷却方式	3 段ペルチェ素子・強制空冷

図 4.5: ccd カメラ

(メーカーホームページより引

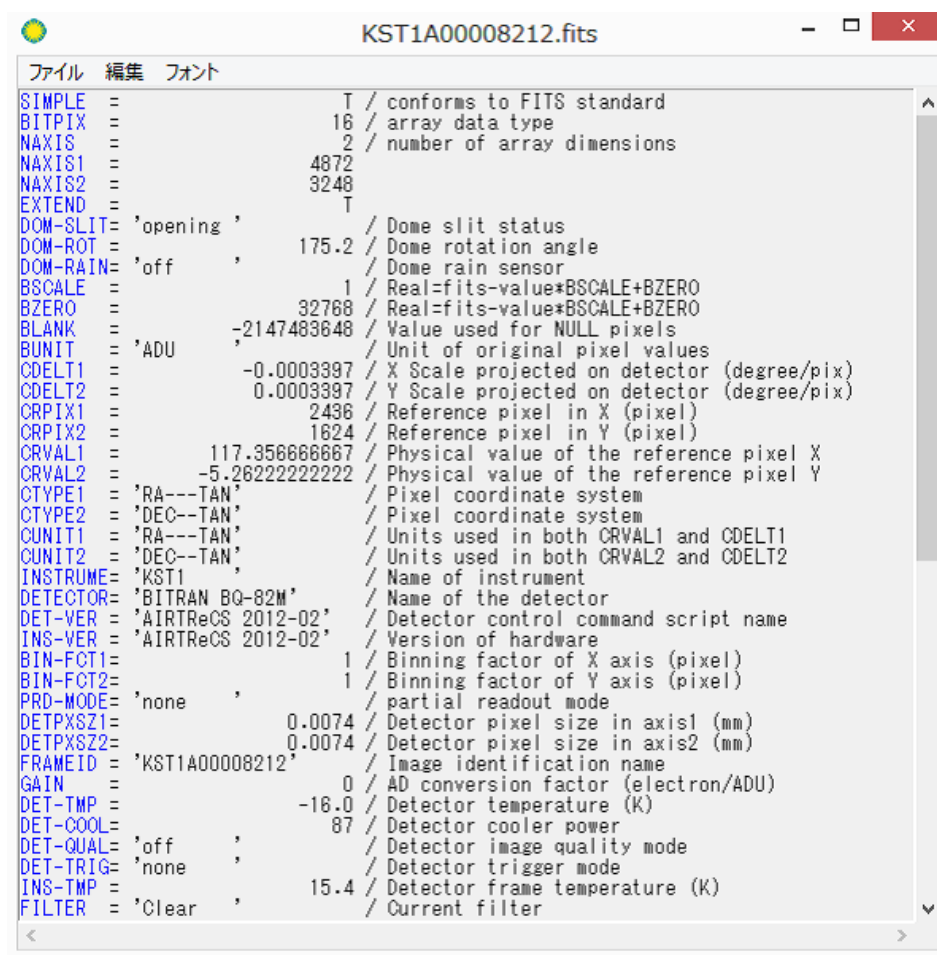
用)<https://www.bitran.co.jp/ccd/product/bq80/bq82.html>

## 4.3 使用ソフトウェア, データ形式

### 4.3.1 FITS

本研究では観測視野を, 冷却 CCD カメラを用いて画像として記録するが, その際 FITS と呼ばれるデータ形式を用いる。FITS (Flexible Image Transport System) とは主に天文学の分野で用いられるファイルの代表的なデータ形式である。FITS は単なる画像形式ではなく,

ASC テキストで記述されたヘッダとバイナリの多次元データ配列で構成されている。そのため画像データに関する詳細な情報がヘッダファイルに書き込まれている。具体的には撮像日時, 画像中心の方位角・高度, 露光時間などである。以下にヘッダの例を図 4.6 に示す。



```

KST1A00008212.fits
ファイル 編集 フォント
SIMPLE = T / conforms to FITS standard
BITPIX = 16 / array data type
NAXIS = 2 / number of array dimensions
NAXIS1 = 4872
NAXIS2 = 3248
EXTEND = T
DOM-SLIT = 'opening' / Dome slit status
DOM-ROT = 175.2 / Dome rotation angle
DOM-RAIN = 'off' / Dome rain sensor
BSCALE = 1 / Real=fits-value*BSCALE+BZERO
BZERO = 32768 / Real=fits-value*BSCALE+BZERO
BLANK = -2147483648 / Value used for NULL pixels
BUNIT = 'ADU' / Unit of original pixel values
CDEL1 = -0.0003397 / X Scale projected on detector (degree/pix)
CDEL2 = 0.0003397 / Y Scale projected on detector (degree/pix)
CRPIX1 = 2436 / Reference pixel in X (pixel)
CRPIX2 = 1624 / Reference pixel in Y (pixel)
CRVAL1 = 117.356666667 / Physical value of the reference pixel X
CRVAL2 = -5.26222222222 / Physical value of the reference pixel Y
CTYPE1 = 'RA---TAN' / Pixel coordinate system
CTYPE2 = 'DEC--TAN' / Pixel coordinate system
CUNIT1 = 'RA---TAN' / Units used in both CRVAL1 and CDEL1
CUNIT2 = 'DEC--TAN' / Units used in both CRVAL2 and CDEL2
INSTRUME = 'KST1' / Name of instrument
DETECTOR = 'BITRAN BQ-82M' / Name of the detector
DET-VER = 'AIRReCS 2012-02' / Detector control command script name
INS-VER = 'AIRReCS 2012-02' / Version of hardware
BIN-FCT1 = 1 / Binning factor of X axis (pixel)
BIN-FCT2 = 1 / Binning factor of Y axis (pixel)
PRD-MODE = 'none' / partial readout mode
DETPXSZ1 = 0.0074 / Detector pixel size in axis1 (mm)
DETPXSZ2 = 0.0074 / Detector pixel size in axis2 (mm)
FRAMEID = 'KST1A00008212' / Image identification name
GAIN = 0 / AD conversion factor (electron/ADU)
DET-TMP = -16.0 / Detector temperature (K)
DET-COOL = 87 / Detector cooler power
DET-QUAL = 'off' / Detector image quality mode
DET-TRIG = 'none' / Detector trigger mode
INS-TMP = 15.4 / Detector frame temperature (K)
FILTER = 'Clear' / Current filter

```

図 4.6: FITS ヘッダ例

### 4.3.2 ds9

ds9 とは FITS 形式の画像データを表示することができるソフトウェアである. linear/log スケール, カラーマップの調整することが可能であり, コントラスト調整により視認しづらい天体を確認することが出来る. また静止画における X, Y 座標 (ピクセル) を表示させることができ, 座標と赤経, 赤緯に結びつけることも可能である. 図 4.7 と図 4.8 にベテルギウスの画像を ds9 によりコントラスト調整した様子を示す.

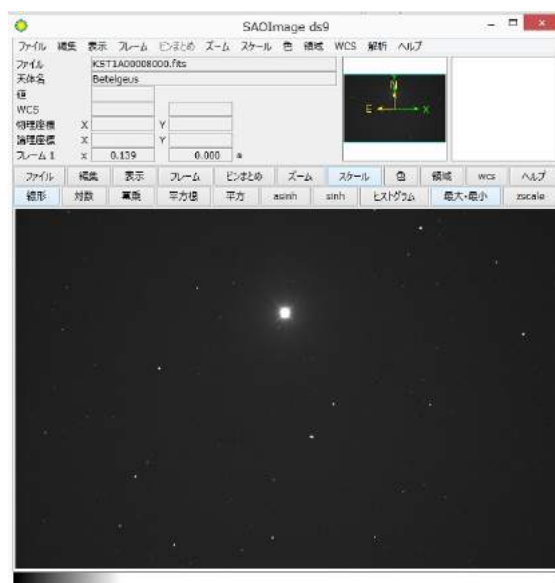


図 4.7: ベテルギウス コントラスト調整前

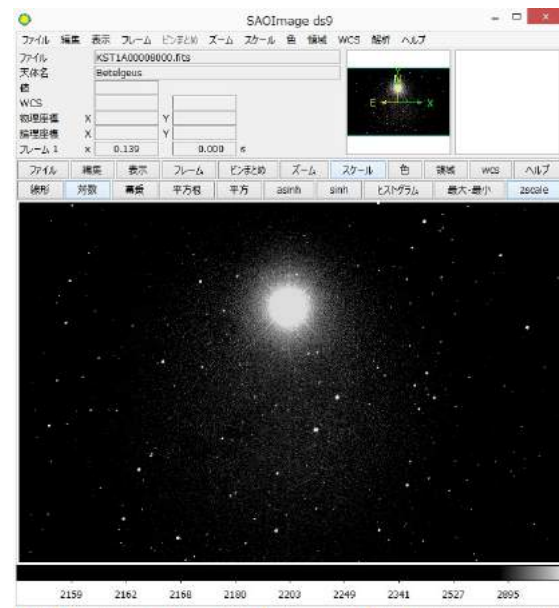


図 4.8: ベテルギウス コントラスト調整後

### 4.3.3 IRAF

IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) とはアメリカ国立天文台が開発した, UNIX 向け天体画像処理ソフトウェアである. 画像データのスペクトル解析や撮影された恒星の輝度, コントラストの測定等に用いられる. 本研究で行われる画像解析は全てこの IRAF に搭載されているパッケージを用いて行った.

### 4.3.4 PyRAF

PyRAF とは python から IRAF のタスクを関数として用いることが出来るソフトウェアである. 解析手順を Python スクリプトで記述することが可能なため, 解析作業を簡略化することが出来る. 本研究では IRAF ではなく PyRAF から IRAF タスクを呼び出し, 解析を行った.

## 4.4 観測手法, 計画

### 4.4.1 観測手法

本研究の観測手法としては望遠鏡の恒星追尾機能をオフにする手法を選択した. 恒星追尾機能とは, 赤道儀式架台と時計装置を用いて天体の日周運動を追尾するものである. この機能をオフとは, 視野を上空の 1 点に固定することになる. すると日周運動をしている恒星は線状の像として写り, 静止軌道上に存在する物体は点状の像として映ることとなる. そのため撮像された像が恒星なのか人工物体なのかだけでなく, 静止軌道上の物なのか, それ以外の軌道に存在するものなのかまでも一度に判断することが出来る.

### 4.4.2 観測範囲

次期技術試験衛星投入予定位置は静止軌道上である. その中でも複数の候補が存在するが, 次期技術試験衛星に関する討論会報告書より現在最も有力な候補となっている位置が 143E(東

経  $143^{\circ}$  ) の点である．この位置には現在, 超高速インターネット衛星 WINDS(きずな) と呼ばれる通信衛星が存在する．そのため本研究ではこの WINDS を中心とした範囲を観測範囲と定めることとした．今回用いる望遠鏡の視野は  $1.1^{\circ} \times 1.6^{\circ}$  なので, WINDS を中心に捉えた画像だけでなく, 画像の中心を, WINDS 中心の画像の上下左右に 1,2 視野分ずつずらして撮像した画像も加えることで, およそ  $3^{\circ} \times 5^{\circ}$  の範囲の探索を行った．そのため今回の観測範囲は合計 9 つの視野から構成されている．今回の観測範囲の全体図を図 4.9 に示す．視野はそれぞれ少しずつオーバーラッピングされているようになっている．またそれぞれの視野に F11 から F33 までの視野番号を割り当てた．

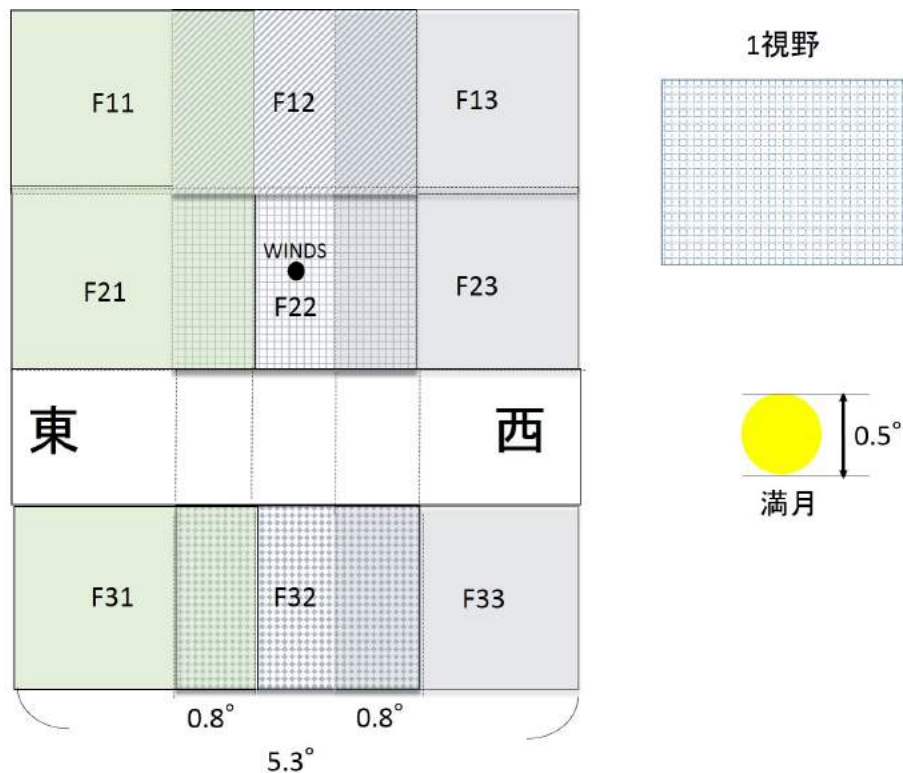


図 4.9: 観測範囲



#### 4.4.3 観測計画

観測は雲による観測への影響などを考慮し、複数回行うこととした。具体的には F11, F12, F13, F21, F22, F23, F31, F32, F33 の順番に F11 から F33 までの観測を 5 回にわたり実行する。冷却 CCD カメラの露光時間は 10s, 20s, 30s の三種類で行う。また WINDS 中心の視野に関しては 1s, 5s, 10s, 20s, 30s, 40s, 50s, 60s で撮像を行う。さらにこのような広く浅い観測に加え、一つの視野を連続して撮像する狭く浅い観測も行う。こちらは WINDS 中心の視野を露光時間 10s で 10 回連続撮像する。観測計画を次の表で示す。尚、WINDS の位置 (Az, El) は JAXA 軌道情報サイトの値を用いる。こちらの WEB ページは任意の TLE と時刻、観測位置を入力することで、入力した時刻に観測地からみた Azimuth, Elevation を表示することが出来る。図 4.10 に JAXA 軌道情報サイトを示す。



図 4.10: JAXA 軌道情報サイト

[http://odweb.tksc.jaxa.jp/odds/main.jsp\\_j.html](http://odweb.tksc.jaxa.jp/odds/main.jsp_j.html) 2018/01/11 アクセス

表 4.3: 観測計画

観測順	フィールド	中心 Az	中心 El	露光時間
		度	度	秒
1	F22	176.1	48.7	1

観測順	フィールド	中心 Az	中心 El	露光時間
2	F22	176.1	48.7	5
3	F22	176.1	48.7	10
4	F22	176.1	48.7	20
5	F22	176.1	48.7	30
6	F22	176.1	48.7	40
7	F22	176.1	48.7	50
8	F22	176.1	48.7	60
9	F11	174.6	49.6	10
10	F12	176.1	49.6	10
11	F13	177.6	49.6	10
12	F21	174.6	48.7	10
13	F22	176.1	48.7	10
14	F23	177.6	48.7	10
15	F31	174.6	46.8	10
16	F32	176.1	46.8	10
17	F33	177.6	46.8	10
18	F11	174.6	49.6	10
19	F12	176.1	49.6	10
20	F13	177.6	49.6	10
21	F21	174.6	48.7	10
22	F22	176.1	48.7	10
23	F23	177.6	48.7	10
24	F31	174.6	46.8	10
25	F32	176.1	46.8	10



観測順	フィールド	中心 Az	中心 El	露光時間
26	F33	177.6	46.8	10
27	F11	174.6	49.6	20
28	F12	176.1	49.6	20
29	F13	177.6	49.6	20
30	F21	174.6	48.7	20
31	F22	176.1	48.7	20
32	F23	177.6	48.7	20
33	F31	174.6	46.8	20
34	F32	176.1	46.8	20
35	F33	177.6	46.8	20
36	F11	174.6	49.6	20
37	F12	176.1	49.6	20
38	F13	177.6	49.6	20
39	F21	174.6	48.7	20
40	F22	176.1	48.7	20
41	F23	177.6	48.7	20
42	F31	174.6	46.8	20
43	F32	176.1	46.8	20
44	F33	177.6	46.8	20
45	F11	174.6	49.6	30
46	F12	176.1	49.6	30
47	F13	177.6	49.6	30
48	F21	174.6	48.7	30
49	F22	176.1	48.7	30

観測順	フィールド	中心 Az	中心 El	露光時間
50	F23	177.6	48.7	30
51	F31	174.6	46.8	30
52	F32	176.1	46.8	30
53	F33	177.6	46.8	30
54	フラット			1
55	フラット			1
56	フラット			1
57	フラット			1
58	フラット			1
59	フラット			1
60	フラット			1
61	フラット			1
62	フラット			1
63	フラット			1
64	フラット			1
65～	ダーク			1,5,10,20,30,50,60

## 4.5 1次処理

本研究では撮像画像に天文学の世界で用いられる 1 次処理と呼ばれる画像処理を施した。この画像処理は以下の 2 種類のノイズを除去するための手法である。

一つ目は CCD の暗電流ノイズの除去である。CCD 素子は光が当たった時に電子を放出するが、露出時間を長くすると CDD 素子が熱を持ち余計な電子が放出されてしまう。この電子が暗電流ノイズとして撮像画像に影響を与える。このノイズを除去するためにダークフレームを用いたダーク処理を施す。ダークフレームとは CCD 素子に光が全く当たらない状態で

撮像した画像である。つまりダークフレームには暗電流ノイズのみが撮像されている。このダークフレームの各ピクセルのカウント値を観測画像の各ピクセルのカウント値から引き算することでダークノイズを除去することが出来る。但しダークフレームは観測に用いた観測環境と同じ状況、同じ露光時間で撮像しなくてはならない。このダークフレームを取得するために本研究では望遠鏡のフィルターを、光を遮る物に変更した状態で撮像を行うこととした。

二つ目は CCD の感度ムラ、受光面に付着したゴミや周辺減光の影響の除去である。CCD 素子の感度は一様ではなくムラがあることが知られている。そのためこのノイズを除去するためにフラットフレームを用いたフラット処理を観測画像に施す。フラットフレームとは CCD 素子に一様に光が当たるようにして撮像した画像である。このフラットフレームの各ピクセル値で観測画像のピクセル値を割り算することでノイズを除去することが出来る。フラットフレームもダークフレームと同様に観測時と全く同じ環境で撮像しなければならない。またフラットフレームにもダークノイズが存在するためフラットフレーム自体にもダークフレームによる処理を施す必要がある。このフラットフレームを取得するために本研究ではライトの明かりで望遠鏡ドームの内壁を照らした状態で露光時間 1s にて撮像を行った。

本研究ではダークフレーム、フラットフレーム共に同じ画像を 10 枚撮像し平均化した物を最終的なダークフレーム、フラットフレームとして処理に用いることとした。図 4.11 に 1 次処理の概念図を示す。



図 4.11: 1 次処理概念図

## 第5章 観測結果

### 5.1 観測データ

観測は気候の安定しやすい冬, 具体的には 2017 年 1 月の第 3 週に行った. 観測時刻としては phase angle が極小となる深夜帯を狙って実行した. 観測自体は 5 日に渡って行ったが, 天候などの影響によりうまく撮像できていないものも多かった. そのため本研究では 2017 年 1 月 18 日と 1 月 19 日の撮像データを用いて解析を進めた. 以下に観測データ詳細情報のまとめを示す. 1 月 18 日のデータは観測装置自体の試験として撮像したものであり, 第四章で定義した観測範囲外の視野を撮像している. 1 月 19 日の撮像画像は全て観測範囲内を撮像している. この日の観測では望遠鏡の向きの制御が正しく行われているかを確認するため, 複数回テスト観測を行った. なお, Az, El の単位は deg, 赤経  $\alpha$  は (h, m, s), 赤緯  $\delta$  は ( $^{\circ}$ ,  $'$ ,  $''$ ) となる.

表 5.1: 観測データ詳細情報 1(2017 年 1 月 18 日)

ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
	時:分:秒		度	度	h: m: s	$^{\circ}$ : $'$ : $''$	秒
KST1A000080001	9:44:02	試験観測	172.2	48.0	3:19:58	-5:43:12	10
KST1A000080002	9:49:29	試験観測	172.2	48.0	3:26:02	-5:43:12	50
KST1A000080009	12:27:55	試験観測	172.2	48.0	6:04:16	-5:43:12	10
KST1A000080010	12:29:48	試験観測	172.2	48.0	6:06:44	-5:43:12	50

表 5.2: 観測データ詳細情報 2(2017 年 1 月 19 日)

ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
	時:分:秒		度	度	h: m: s	$^{\circ}$ : $'$ : $''$	秒
KST1A00008197	13:46:38	テスト	176.1	48.29	7:30:33	-5:40:17	10
KST1A00008198	14:00:29	テスト	176.1	48.29	7:30:33	-5:40:17	10
KST1A00008199	14:04:19	テスト	176.1	48.39	7:34:25	-5:34:18	10
KST1A00008200	14:06:39	テスト	176.1	48.5	7:36:45	-5:27:43	10

ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
KST1A00008201	14:08:49	F22	176.1	48.7	7:38:49	-5:15:4	10
KST1A00008202	14:10:02	F22	176.1	48.7	7:40:11	-5:15:44	10
KST1A00008203	14:11:23	F22	176.1	48.7	7:41:23	-5:15:44	10
KST1A00008204	14:12:20	F22	176.1	48.7	7:42:30	-5:15:44	10
KST1A00008205	14:13:15	F22	176.1	48.7	7:43:15	-5:15:44	10
KST1A00008206	14:14:20	F22	176.1	48.7	7:44:21	-5:15:44	10
KST1A00008207	14:15:07	F22	176.1	48.7	7:45:17	-5:15:44	10
KST1A00008208	14:16:00	F22	176.1	48.7	7:46:01	-5:15:44	10
KST1A00008209	14:16:48	F22	176.1	48.7	7:46:54	-5:15:44	10
KST1A00008210	14:17:34	F22	176.1	48.7	7:47:33	-5:15:44	10
KST1A00008211	14:18:31	F22	176.1	48.7	7:48:42	-5:15:44	10
KST1A00008212	14:19:21	F22	176.1	48.7	7:49:26	-5:15:44	10
KST1A00008214	14:22:24	テスト	176.1	49.6	7:52:19	-4:21:51	10
KST1A00008215	14:24:39	F11	174.6	49.6	7:58:22	-4:17:59	10
KST1A00008216	14:26:38	F12	176.1	49.6	7:56:31	-4:21:50	10
KST1A00008217	14:29:01	F13	177.6	49.6	7:55:01	-4:24:27	10
KST1A00008218	14:30:19	F21	174.6	48.7	8:04:14	-5:11:49	10
KST1A00008219	14:31:31	F22	176.1	48.7	8:01:41	-5:15:44	10
KST1A00008221	14:34:32	F31	174.6	46.8	8:09:16	-7:5:26	10
KST1A00008222	14:36:38	F23	177.6	48.7	8:02:38	-5:18:24	10
KST1A00008223	14:38:26	F32	176.1	46.8	8:09:01	-7:9:31	10
KST1A00008224	14:39:42	F33	177.6	46.8	8:06:10	-7:12:17	10
KST1A00008225	14:41:13	F22	176.1	48.7	8:11:30	-5:15:44	20
KST1A00008226	14:42:29	F22	176.1	48.7	8:13:07	-5:15:44	40
KST1A00008227	14:43:54	F22	176.1	48.7	8:14:02	-5:15:44	10
KST1A00008228	14:44:45	F22	176.1	48.7	8:15:49	-5:15:44	60
KST1A00008229	14:46:58	F22	176.1	48.7	8:17:01	-5:15:44	5
KST1A00008230	14:47:45	F22	176.1	48.7	8:17:43	-5:15:44	1
KST1A00008231	14:48:27	F22	176.1	48.7	8:18:52	-5:15:44	30
KST1A00008232	14:49:58	F22	176.1	48.7	8:20:43	-5:15:44	50
KST1A00008233	14:51:57	F11	174.6	49.6	8:25:48	-4:17:59	10
KST1A00008234	14:53:05	F12	176.1	49.6	8:23:04	-4:21:50	10
KST1A00008235	14:54:23	F13	177.6	49.6	8:20:28	-4:24:27	10
KST1A00008236	14:55:55	F21	174.6	48.7	8:30:07	-5:11:49	10
KST1A00008237	14:57:32	F22	176.1	48.7	8:27:44	-5:15:44	10
KST1A00008238	14:59:14	F23	177.6	48.7	8:25:28	-5:18:24	10
KST1A00008239	15:02:53	F31	174.2	46.8	8:38:46	-7:04:07	10
KST1A00008240	15:04:04	F32	176.1	46.8	8:34:42	-7:09:31	10
KST1A00008241	15:05:52	F33	177.6	46.8	8:32:22	-7:12:17	10
KST1A00008242	15:07:23	F11	174.6	49.6	8:41:23	-4:17:59	10
KST1A00008243	15:08:37	F12	176.1	49.6	8:38:36	-4:21:50	10

ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
KST1A00008244	15:10:05	F13	177.6	49.6	8:36:16	-4:24:27	10
KST1A00008245	15:11:20	F21	174.6	48.7	8:45:35	-5:11:49	10
KST1A00008246	15:12:50	F22	176.1	48.7	8:43:06	-5:15:44	10
KST1A00008247	15:13:58	F23	177.6	48.7	8:40:14	-5:18:24	10
KST1A00008248	15:15:37	F31	174.6	46.8	8:50:26	-7:5:26	10
KST1A00008249	15:16:51	F32	176.1	46.8	8:47:34	-7:9:31	10
KST1A00008250	15:20:52	F33	177.6	46.8	8:47:24	-7:12:17	10
KST1A00008251	15:22:09	F11	174.6	49.6	8:56:09	-4:17:59	20
KST1A00008252	15:25:03	F12	176.1	49.6	8:55:15	-4:21:50	20
KST1A00008253	15:26:11	F13	177.6	49.6	8:52:25	-4:24:27	20
KST1A00008254	15:27:40	F21	174.6	48.7	9:01:57	-5:11:49	20
KST1A00008255	15:29:04	F22	176.1	48.7	8:59:33	-5:15:44	20
KST1A00008256	15:30:23	F23	177.6	48.7	8:56:45	-5:18:24	20
KST1A00008257	15:31:59	F31	174.6	46.8	9:07:01	-7:5:26	20
KST1A00008258	15:33:56	F32	176.1	46.8	9:04:46	-7:9:31	20
KST1A00008259	15:35:20	F33	177.6	46.8	9:02:00	-7:12:17	20
KST1A00008260	15:37:06	F11	174.6	49.6	9:11:07	-4:17:59	20
KST1A00008261	15:38:30	F12	176.1	49.6	9:08:52	-4:21:50	20
KST1A00008262	15:39:51	F13	177.6	49.6	9:06:12	-4:24:27	20
KST1A00008263	15:41:24	F21	174.6	48.7	9:15:48	-5:11:49	20
KST1A00008264	15:42:49	F22	176.1	48.7	9:13:14	-5:15:44	20
KST1A00008265	15:44:14	F23	177.6	48.7	9:10:50	-5:18:24	20
KST1A00008266	15:45:51	F31	174.6	46.8	9:20:55	-7:5:26	20
KST1A00008267	15:47:18	F32	176.1	46.8	9:18:16	-7:9:31	20
KST1A00008268	15:48:44	F33	177.6	46.8	9:15:36	-7:12:17	20
KST1A00008269	15:55:23	テスト	176.1	48.7	9:25:48	-5:15:44	10
KST1A00008270	15:57:28	テスト	176.5	48.7	9:26:50	-5:16:34	10
KST1A00008271	16:00:00	テスト	175.6	48.7	9:31:35	-5:14:35	10
KST1A00008272	16:13:35	テスト	176.1	48.7	9:43:52	-5:15:44	10
KST1A00008273	16:16:21	テスト	176.1	48.7	9:46:48	-5:15:44	10
KST1A00008274	16:17:31	テスト	176.1	48.7	9:47:56	-5:15:44	10
KST1A00008275	16:19:18	テスト	176.1	48.7	9:49:46	-5:15:44	10
KST1A00008276	16:25:12	テスト	176.1	48.7	9:55:36	-5:15:44	10
KST1A00008277	16:28:39	テスト	176.1	48.7	9:59:06	-5:15:44	10
KST1A00008278	16:31:00	F11	174.6	49.6	10:05:24	-4:17:59	30
KST1A00008279	16:33:39	F12	176.1	49.6	10:04:13	-4:21:50	30
KST1A00008280	16:35:41	F13	177.6	49.6	10:02:19	-4:24:27	30
KST1A00008281	16:37:14	F21	174.6	48.7	10:11:54	-5:11:49	30
KST1A00008282	16:39:00	F22	176.1	48.7	10:09:41	-5:15:44	30
KST1A00008283	16:40:28	F23	177.6	48.7	10:07:10	-5:18:24	30
KST1A00008284	16:42:03	F31	174.6	46.8	10:17:15	-7:5:26	30

ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
KST1A00008285	16:43:34	F32	176.1	46.8	10:14:44	-7:9:31	30
KST1A00008286	16:45:12	F33	177.6	46.8	10:12:15	-7:12:17	30
KST1A00008287	16:54:28	フラット					1
KST1A00008288	16:55:01	フラット					1
KST1A00008289	16:55:32	フラット					1
KST1A00008290	16:56:04	フラット					1
KST1A00008291	16:56:37	フラット					1
KST1A00008292	16:57:09	フラット					1
KST1A00008293	16:57:40	フラット					1
KST1A00008294	16:58:13	フラット					1
KST1A00008295	16:58:49	フラット					1
KST1A00008296	16:59:17	フラット					1
KST1A00008298	17:06:03	ダーク					1
KST1A00008299	17:06:35	ダーク					1
KST1A00008300	17:07:07	ダーク					1
KST1A00008301	17:07:40	ダーク					1
KST1A00008302	17:08:12	ダーク					1
KST1A00008303	17:08:44	ダーク					1
KST1A00008304	17:09:16	ダーク					1
KST1A00008305	17:09:48	ダーク					1
KST1A00008306	17:10:20	ダーク					1
KST1A00008307	17:10:52	ダーク					1
KST1A00008308	17:12:19	ダーク					5
KST1A00008309	17:12:55	ダーク					5
KST1A00008310	17:13:31	ダーク					5
KST1A00008311	17:14:07	ダーク					5
KST1A00008312	17:14:43	ダーク					5
KST1A00008313	17:15:20	ダーク					5
KST1A00008314	17:15:55	ダーク					5
KST1A00008315	17:16:31	ダーク					5
KST1A00008316	17:17:08	ダーク					5
KST1A00008317	17:17:44	ダーク					5
KST1A00008318	17:19:20	ダーク					10
KST1A00008319	17:20:02	ダーク					10
KST1A00008320	17:20:43	ダーク					10
KST1A00008321	17:21:24	ダーク					10
KST1A00008322	17:22:05	ダーク					10
KST1A00008323	17:22:45	ダーク					10
KST1A00008324	17:23:26	ダーク					10
KST1A00008325	17:24:07	ダーク					10
KST1A00008326	17:24:48	ダーク					10

ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
KST1A00008327	17:25:29	ダーク					10
KST1A00008328	17:27:12	ダーク					20
KST1A00008329	17:28:04	ダーク					20
KST1A00008330	17:28:55	ダーク					20
KST1A00008331	17:29:46	ダーク					20
KST1A00008332	17:30:37	ダーク					20
KST1A00008333	17:31:28	ダーク					20
KST1A00008334	17:32:19	ダーク					20
KST1A00008335	17:33:11	ダーク					20
KST1A00008336	17:34:02	ダーク					20
KST1A00008337	17:34:52	ダーク					20
KST1A00008338	17:36:54	ダーク					30
KST1A00008339	17:37:56	ダーク					30
KST1A00008340	17:38:58	ダーク					30
KST1A00008341	17:39:58	ダーク					30
KST1A00008342	17:41:00	ダーク					30
KST1A00008343	17:42:00	ダーク					30
KST1A00008344	17:43:01	ダーク					30
KST1A00008345	17:44:02	ダーク					30
KST1A00008346	17:45:03	ダーク					30
KST1A00008347	17:46:04	ダーク					30
KST1A00008348	17:48:02	ダーク					30
KST1A00008349	17:49:15	ダーク					40
KST1A00008350	17:50:26	ダーク					40
KST1A00008351	17:51:37	ダーク					40
KST1A00008352	17:52:49	ダーク					40
KST1A00008353	17:54:00	ダーク					40
KST1A00008354	17:55:14	ダーク					40
KST1A00008355	17:56:27	ダーク					40
KST1A00008356	17:57:37	ダーク					40
KST1A00008357	17:58:48	ダーク					40
KST1A00008358	18:00:47	ダーク					50
KST1A00008359	18:02:09	ダーク					50
KST1A00008360	18:03:30	ダーク					50
KST1A00008361	18:04:50	ダーク					50
KST1A00008362	18:06:11	ダーク					50
KST1A00008363	18:07:33	ダーク					50
KST1A00008364	18:08:58	ダーク					50
KST1A00008365	18:10:23	ダーク					50
KST1A00008366	18:11:44	ダーク					50
KST1A00008367	18:13:05	ダーク					50



ファイル名	撮像日時 (UTC)	種類	中心 Az	中心 El	中心 $\alpha$	中心 $\delta$	露出時間
KST1A00008368	18:15:58	ダーク					60
KST1A00008369	18:17:29	ダーク					60
KST1A00008370	18:19:00	ダーク					60
KST1A00008371	18:20:33	ダーク					60
KST1A00008372	18:33:05	ダーク					60
KST1A00008373	18:23:44	ダーク					60
KST1A00008374	18:25:20	ダーク					60
KST1A00008375	18:26:51	ダーク					60
KST1A00008376	18:28:22	ダーク					60
KST1A00008377	18:29:53	ダーク					60

## 5.2 一次処理結果

撮像画像には第四章で述べた 1 次処理を施した。具体的には IRAF の”imarith, imcomb”パッケージを用いた。imarith は画像の各ピクセル値に対して四則演算を行う機能であり、imcomb は imarith の処理をまとめて行う機能である。この機能でまずそれぞれの露光時間について 10 枚のダークフレーム合算し、中央値とったダークメディアン画像を作成した。その後各観測画像及びフラットフレームからダークメディアン画像を引いた。そして 10 枚のフラット画像を合算し、中央値をとりフラットメディアン画像を作成した。最後に観測画像をフラットメディアン画像で割る処理を行った。この処理によりバックグラウンドカウントが半分程度になり、ノイズを除去することが出来た。図 5.1 に処理の結果の 1 例を示す。

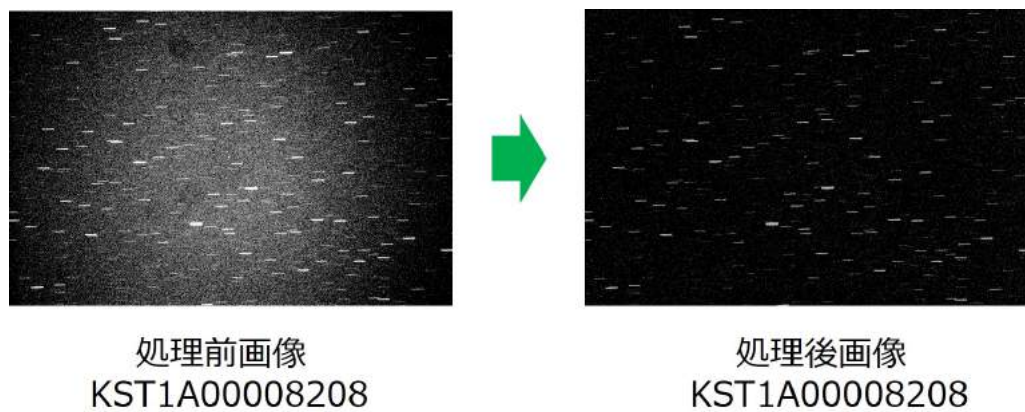


図 5.1: 1 次処理の結果

## 5.3 撮像画像

撮像画像の数が膨大となるため、本論文では今回の撮像画像の中から代表的なものを以下に示す。尚、撮像時刻は全て UTC 表記である。また各キャプション内の ( ) 内は露出時間である。

### 5.3.1 試験観測結果 (撮像時刻 1/18 09:44:02~12:29:47)



図 5.2: 試験観画像 1(10s)



図 5.3: 試験観画像 2(50s)

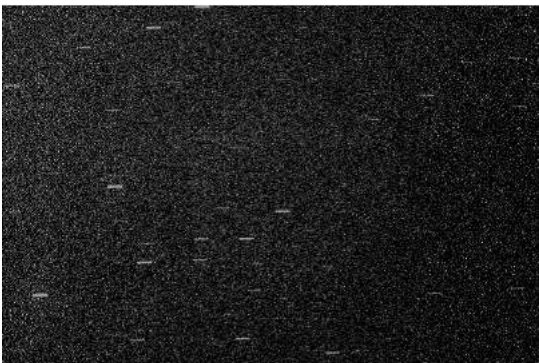


図 5.4: 試験観画像 3(10s)

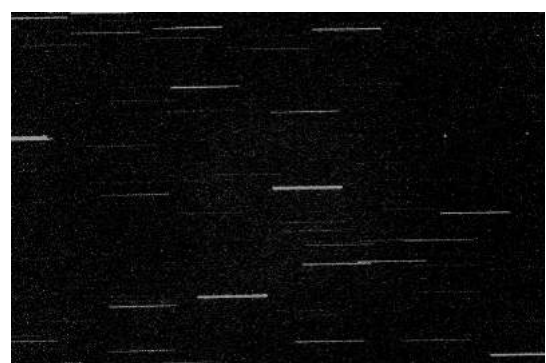


図 5.5: 試験観画像 4(50s)

### 5.3.2 露出時間 10s 觀測結果 (撮像時刻 14:24:39~14:39:42)

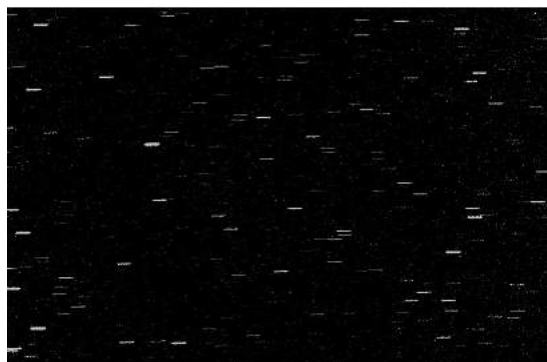


図 5.6: F11(10s)

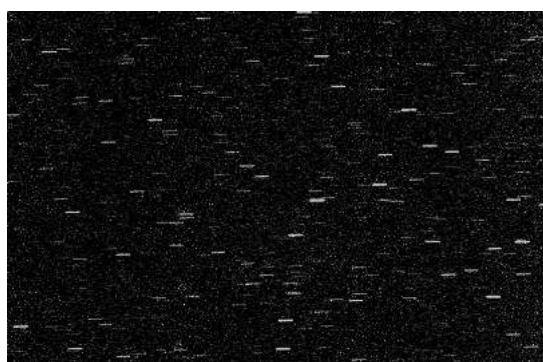


図 5.7: F12(10s)

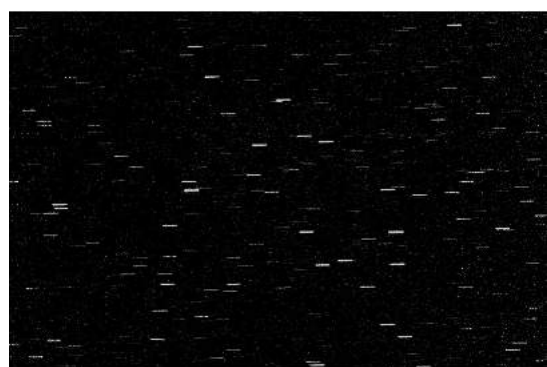


図 5.8: F13(10s)

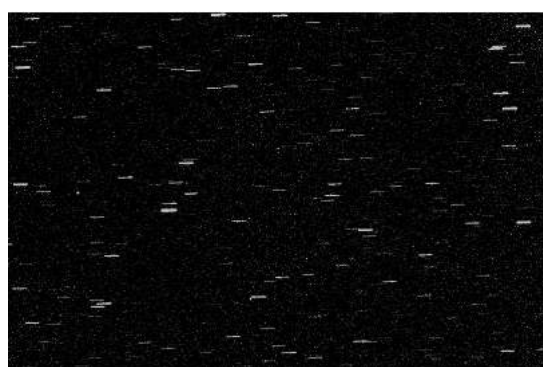


図 5.9: F21(10s)

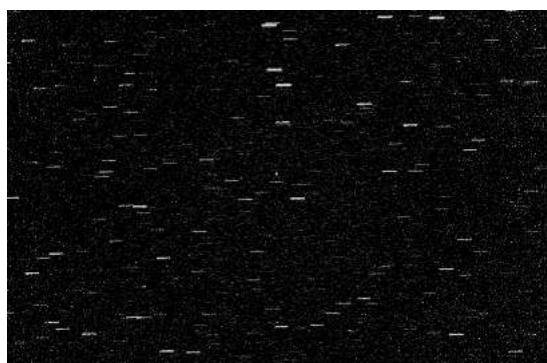


図 5.10: F22(10s)

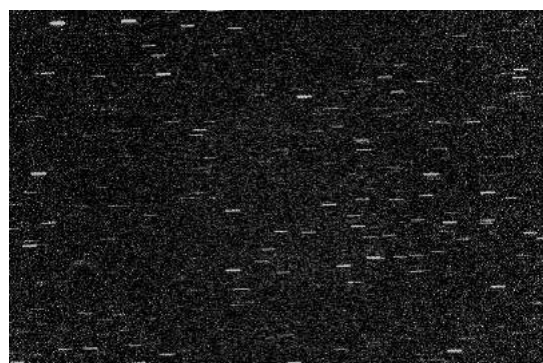


図 5.11: F23(10s)

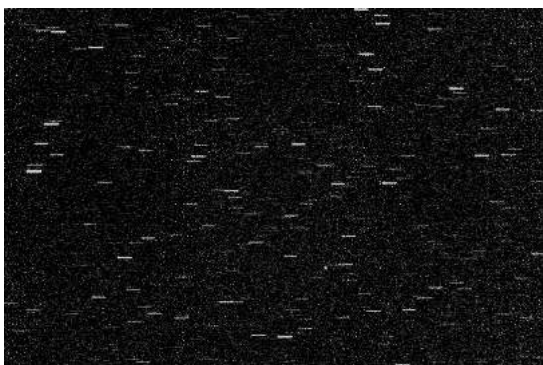


図 5.12: F31(10s)

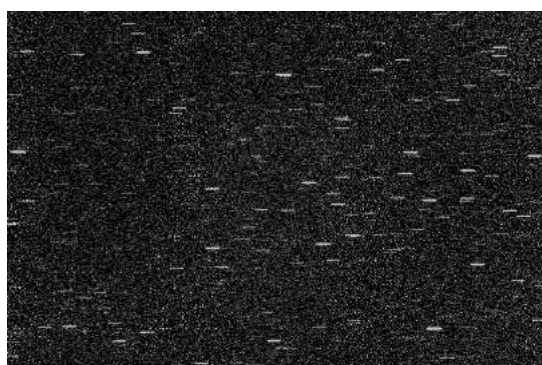


図 5.13: F32(10s)

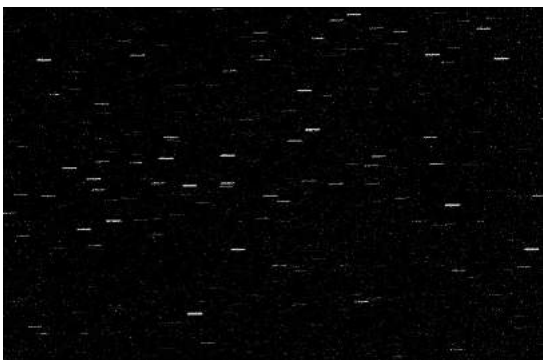


図 5.14: F33(10s)

### 5.3.3 露出時間 20s 観測結果 (撮像時刻 15:22:09~15:35:20)

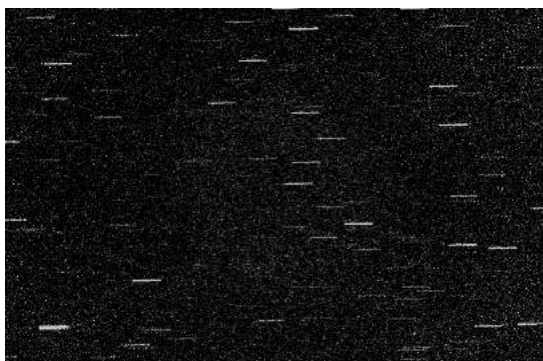


図 5.15: F11(20s)

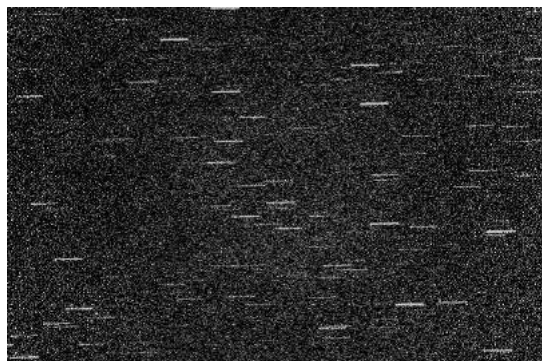


図 5.16: F12(20s)

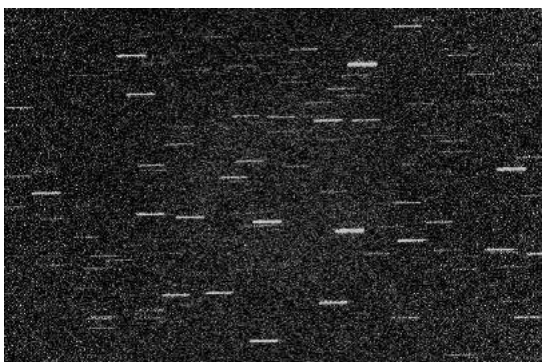


图 5.17: F13(20s)



图 5.18: F21(20s)

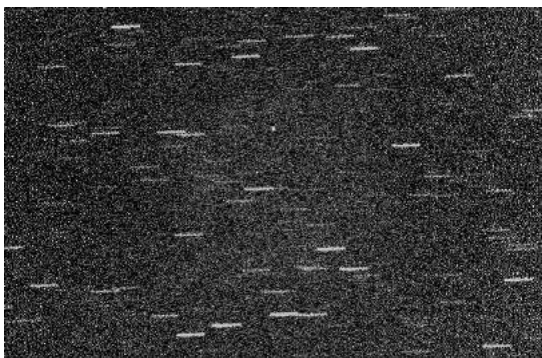


图 5.19: F22(20s)

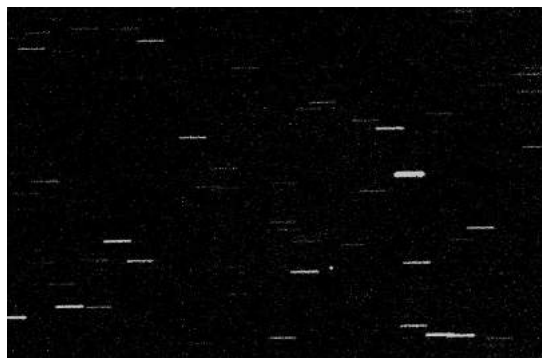


图 5.20: F23(20s)

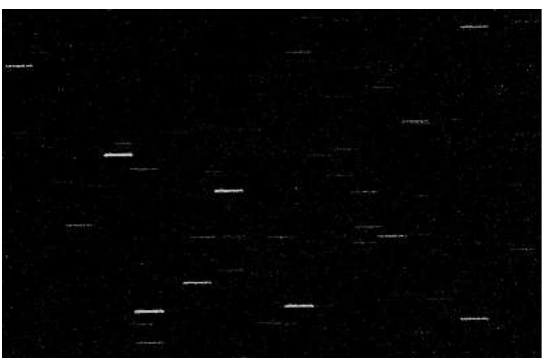


图 5.21: F31(20s)



图 5.22: F32(20s)

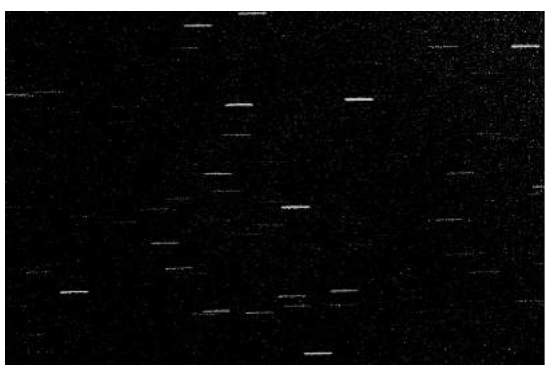


図 5.23: F33(20s)

#### 5.3.4 露出時間 30s 観測結果 (撮像時刻 16:31:00~16:45:12)



図 5.24: F11(30s)



図 5.25: F12(30s)

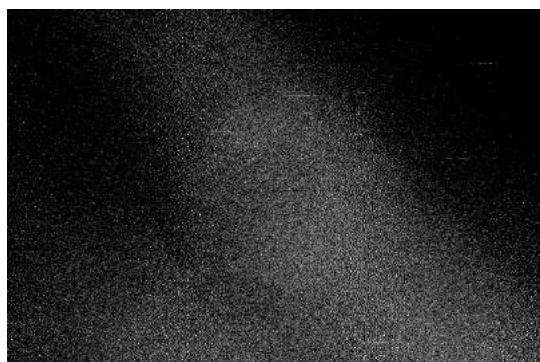


図 5.26: F13(30s)

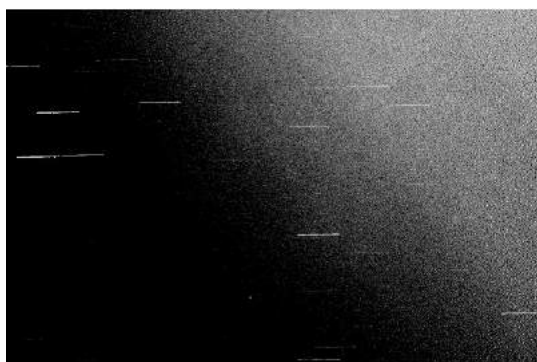


図 5.27: F21(30s)





图 5.28: F22(30s)

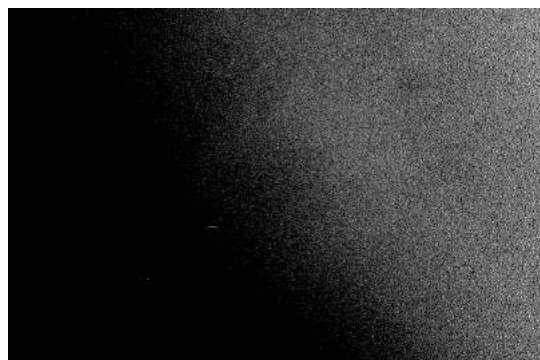


图 5.29: F23(30s)



图 5.30: F31(30s)



图 5.31: F32(30s)

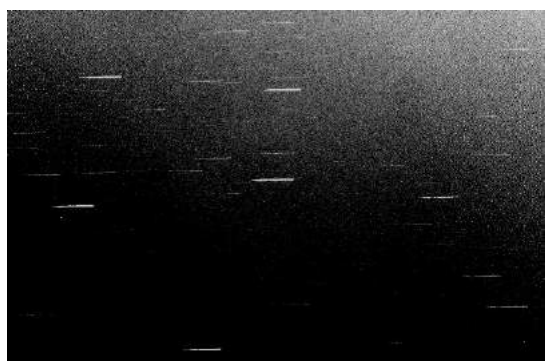


图 5.32: F33(30s)

### 5.3.5 各露出時間での F22 観測結果 (撮像時刻 14:41:12~14:49:57.52)



図 5.33: F22(1s)

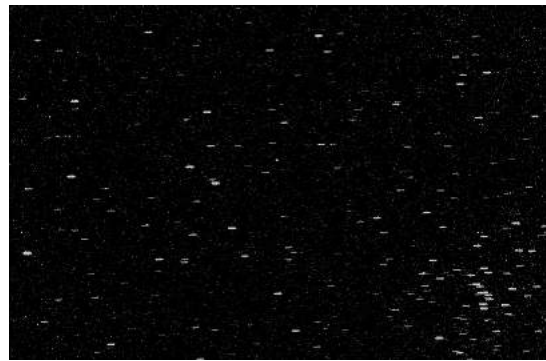


図 5.34: F22(5s)

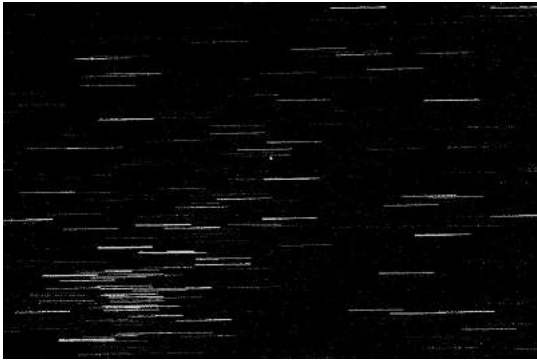


図 5.35: F22(40s)

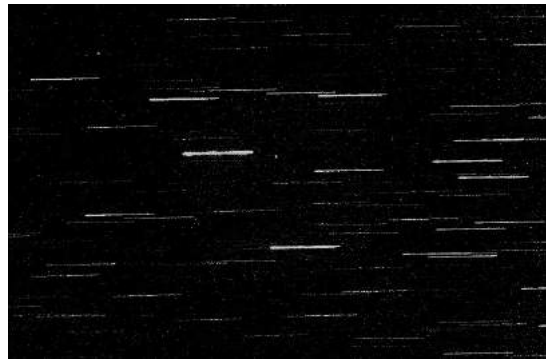


図 5.36: F22(50s)

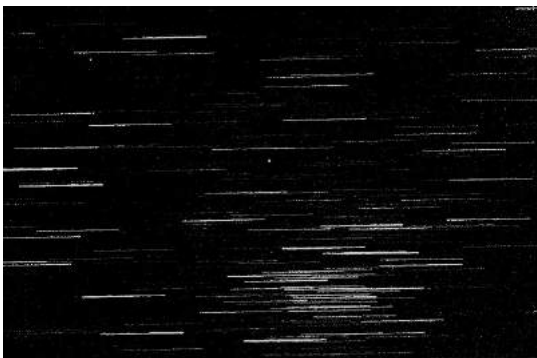


図 5.37: F22(60s)

このように静止軌道上の物体は点像に恒星は線像に写り、露光時間が長い程恒星の線像は長くなっている。また露出時間 30s の画像では大部分が雲に覆われている様子が確認できる。



## 第6章 解析

### 6.1 各画像における点像

今回の観測では 10s 露出, 20s 露出にて, 同一物体と思われる点像を複数個捉えることに成功した. ここでは試験観測, 及び 10s 露出での観測画像に写っていた点像を以下に示す.



図 6.1: 試験画像 (50s) 点像 1



図 6.2: 試験画像 (50s) 点像 2



図 6.3: F21(10s) 点像 1

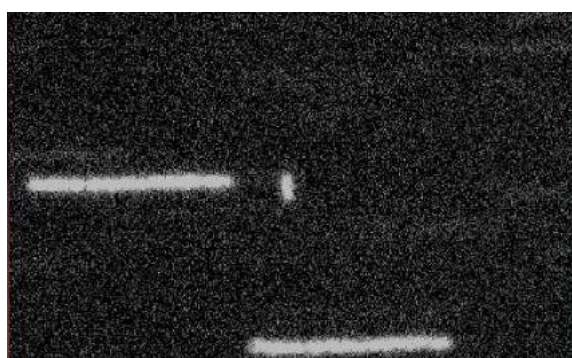


図 6.4: F21(10s) 点像 2

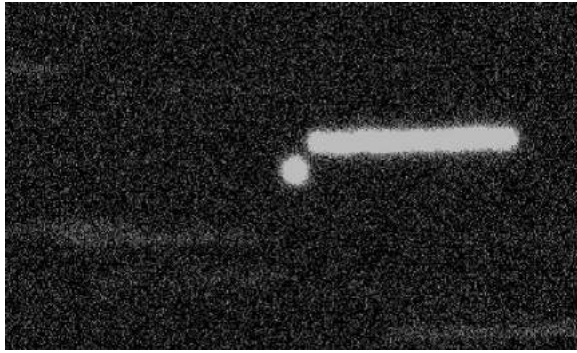


图 6.5: F21(10s) 点像 3



图 6.6: F21(10s) 点像 4



图 6.7: F22(10s) 点像 1

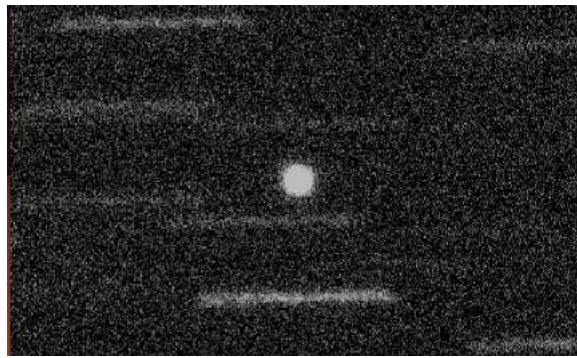


图 6.8: F22(10s) 点像 2

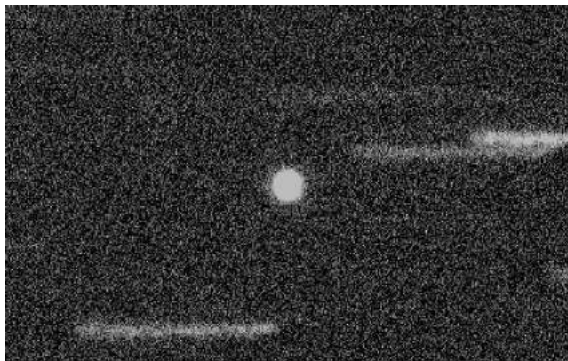


图 6.9: F23(10s) 点像 1

## 6.2 点像スペックルの解析

今回観測された点像について詳細情報の解析を行った。具体的には3章で述べたシーイングの調査を行った。シーイングの計算には像の FWHM (半値半幅) の値が必要となる。像の半値半幅は IRAF のパッケージ imexam によって調べることが出来る。しかし imexam で調べられる半値半幅は単位が pix である。そのためピクセルスケール 1.2 秒角/pix を半値半幅に乗ずることで秒角単位のシーイングを計算した。図 6.10 に imexam の実行画面を示す。また以下の表に各像の半値幅, シーイングを示す。

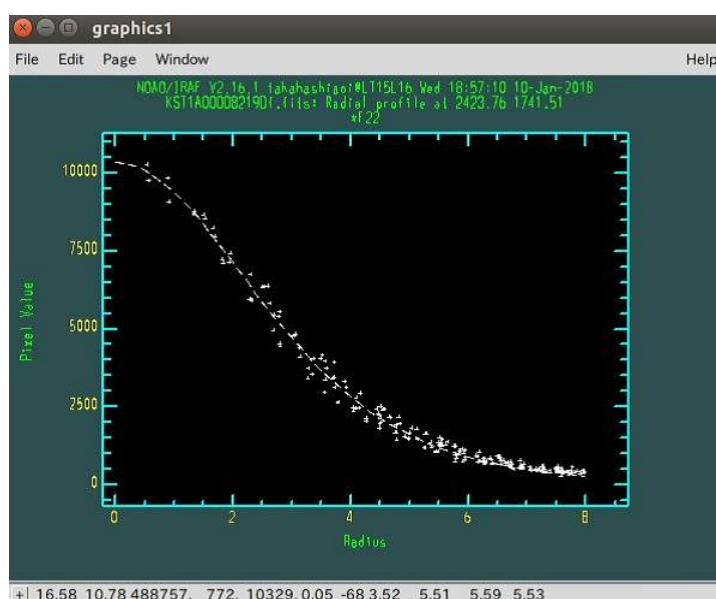


図 6.10: imexam により表示された点像スペクトル

表 6.1: 点像データ詳細情報 1(2017 年 1 月 18 日)

ファイル名	種類	点状の有無	像 1 の FWHM	像 2 の FWHM	像 3 の FWHM	シーイング	シーイング	シーイング
			pix	pix	pix	arcsec	arcsec	arcsec
KST1A000080001	試験観測	有	7.02	7.07		8.49	8.55	
KST1A000080002	試験観測	有	5.92	6.82		7.16	8.25	
KST1A000080009	試験観測	有	6.08	7.57		7.36	9.16	
KST1A000080010	試験観測	有	7.62	7.81		9.22	9.45	

表 6.2: 点像データ詳細情報 2017 年 1 月 19 日)

ファイル名	種類	点状の有無	像 1 の FWHM	像 2 の FWHM	像 3 の FWHM	シーイング	シーイング	シーイング
			pix	pix	pix	arcsec	arcsec	arcsec
KST1A00008197	テスト	有	5.24			6.29	0	0
KST1A00008198	テスト	有	5.32			6.39	0	0

ファイル名	種類	点状の有無	像1の FWHM	像2の FWHM	像3の FWHM	シーイング	シーイング	シーイング
KST1A00008199	テスト	有	5.88			7.06	0	0
KST1A00008200	テスト	有	6.03			7.24	0	0
KST1A00008201	F22	有	5.84			7.01	0	0
KST1A00008202	F22	有	5.70			6.84	0	0
KST1A00008203	F22	有	5.64			6.77	0	0
KST1A00008204	F22	有	5.44			6.53	0	0
KST1A00008205	F22	有	5.03			6.04	0	0
KST1A00008206	F22	有	4.96			5.96	0	0
KST1A00008207	F22	有	5.06			6.08	0	0
KST1A00008208	F22	有	4.82			5.79	0	0
KST1A00008209	F22	有	5.05			6.06	0	0
KST1A00008210	F22	有	5.66			6.80	0	0
KST1A00008211	F22	有	5.14			6.17	0	0
KST1A00008212	F22	有	5.68			6.82	0	0
KST1A00008214	テスト	無				0	0	0
KST1A00008215	F11	無				0	0	0
KST1A00008216	F12	無				0	0	0
KST1A00008217	F13	無				0	0	0
KST1A00008218	F21	有3	6.62	14.6	6.87	7.95	17.6	8.25
KST1A00008219	F22	有2	6.94	5.49		8.33	6.59	0
KST1A00008221	F31	無				0	0	0
KST1A00008222	F23	有	5.63			6.76	0	0
KST1A00008223	F32	無				0	0	0
KST1A00008224	F33	無				0	0	0
KST1A00008225	F22	有2	7.27	6.01		8.73	7.22	0
KST1A00008226	F22	有2	7.84	6.34		9.41	7.61	0
KST1A00008227	F22	有2	6.52	5.14		7.83	6.17	0
KST1A00008228	F22	有2	9.63	7.06		11.6	8.48	0
KST1A00008229	F22	有2	6.42	6.36		7.71	7.64	0
KST1A00008230	F22	有2	5.91	4.85		7.10	5.82	0
KST1A00008231	F22	有2	7.11	5.40		8.54	6.48	0
KST1A00008232	F22	有2	9.24	6.90		11.1	8.28	0
KST1A00008233	F11	無				0	0	0
KST1A00008234	F12	有 (237 の上とかぶり)	8.91			10.7	0	0
KST1A00008235	F13	無				0	0	0
KST1A00008236	F21	有3	6.72	6.22	6.18	8.07	7.47	7.42
KST1A00008237	F22	有2	7.69	6.27		9.23	7.53	0
KST1A00008238	F23	有	7.37			8.85	0	0
KST1A00008239	F31	無				0	0	0
KST1A00008240	F32	無				0	0	0
KST1A00008241	F33	無				0	0	0
KST1A00008242	F11	有 (245 の上とかぶり)	9.56			11.5	0	0
KST1A00008243	F12	有 (246 の上とかぶり)	7.82			9.39	0	0
KST1A00008244	F13	無				0	0	0
KST1A00008245	F21	有3	7.33	6.77	7.4	8.80	8.13	8.88
KST1A00008246	F22	有2	7.97	6.55		9.57	7.86	0
KST1A00008247	F23	有	7.25			8.70	0	0
KST1A00008248	F31	無				0	0	0
KST1A00008249	F32	無				0	0	0
KST1A00008250	F33	無				0	0	0
KST1A00008251	F11	有 (254 の上とかぶり)	7.98			9.58	0	0
KST1A00008252	F12	有 (255 の上とかぶり)	7.97			9.57	0	0
KST1A00008253	F13	無				0	0	0
KST1A00008254	F21	有3	12.3	10.4	10.1	14.7	12.5	12.1
KST1A00008255	F22	有2	12.1	12.1		14.6	14.5	0

ファイル名	種類	点状の有無	像1の FWHM	像2の FWHM	像3の FWHM	シーイング	シーイング	シーイング
KST1A00008256	F23	有	12.5			15.0	0	0
KST1A00008257	F31	無				0	0	0
KST1A00008258	F32	無				0	0	0
KST1A00008259	F33	無				0	0	0
KST1A00008260	F11	有 (263 の上とかぶり)	10.3			12.4	0	0
KST1A00008261	F12	有	11.6			13.9	0	0
KST1A00008262	F13	無				0	0	0
KST1A00008263	F21	有 3	11.3	9.87	11.4	13.6	11.9	13.7
KST1A00008264	F22	有	9.38			11.3	0	0
KST1A00008265	F23	有	10.4			12.5	0	0
KST1A00008266	F31	無				0	0	0
KST1A00008267	F32	無				0	0	0
KST1A00008268	F33	無				0	0	0
KST1A00008269	テスト	有	6.71			8.06	0	0
KST1A00008270	テスト	有	6.89			8.27	0	0
KST1A00008271	テスト	有 2	8.07	7.23		9.69	8.68	0
KST1A00008272	テスト	無 恒星もなし				0	0	0
KST1A00008273	テスト	有	6.32			7.59	0	0
KST1A00008274	テスト	有	5.53			6.64	0	0
KST1A00008275	テスト	有	7.08			8.50	0	0
KST1A00008276	テスト	有	6.01			7.22	0	0
KST1A00008277	テスト	有	5.31			6.38	0	0
KST1A00008278	F11	有 ここから雲多し	6.96			8.36	0	0
KST1A00008279	F12	有 あまり恒星が写っていない	6.12			7.35	0	0
KST1A00008280	F13	無 あまり恒星が写っていない				0	0	0
KST1A00008281	F21	有	5.22			6.27	0	0
KST1A00008282	F22	無				0	0	0
KST1A00008283	F23	無 あまり恒星が写っていない				0	0	0
KST1A00008284	F31	無 あまり恒星が写っていない				0	0	0
KST1A00008285	F32	無				0	0	0
KST1A00008286	F33	有	6.79			8.15	0	0

表からシーイングは露出時間 10s で最小値が 5.82 となっていることが確認できた．一般に日本における典型的なシーイングは 1 秒角から 3 秒角である．このことから観測日時当時は全体的にシーイングが比較的悪い値であったことが分かった．これは鹿島の立地や観測当時の大気の状態によるものである．鹿島宇宙技術センターは海の近くにあり、標高が低く風も吹いている．そのような立地、気候条件から今回このようなシーイングサイズであったことが予想される．

## 6.3 点像の同定

今回観測された点像が既知の物であるのか未知の物であるのか、既知であればその正体が何であるのかを調べるため同定作業を行った．本研究では同定作業を以下の手法にて実施した．まず初めに観測画像から点像の位置を計算する．次に 1 章で述べた JSpOC の軌道情報カ

カタログの情報から観測時に鹿島から見た観測視野に存在していた人工衛星, スペースデブリの位置を計算する. その後, この二つの位置を比較することで既知物体か未知物体かの判断を行うという流れである. 以下にそれぞれの手順の詳細について述べる.

### 6.3.1 点像の位置の計算

本研究では点像の位置を点像の中心の Azimuth, Elevation の値と定義した. 中心 Azimuth, Elevation の計算手法として, 本研究では背景の恒星の位置との相対関係から位置の計算を試みた. 具体的には, まず背景の恒星の同定作業を行い恒星の赤経, 赤緯, Azimuth, Elevation を確認する. その後点像と恒星の間の距離を調べ, 点像の Azimuth, Elevation を計算する.

#### 恒星の同定

恒星の同定には3章で述べた天文シミュレーションソフトウェア”ステラナビゲータ 10”を使用した. まずステラナビゲータ 10 で観測時当時の星空を再現し, 鹿島から見た星空を表示する. この時, CCD 露出時間設定を 10 秒と設定することで実際の観測画像同様恒星が線上に伸びた視野を再現した. 恒星カタログは USNO とティコ第二の二つを用いた. そして実際の観測画像とステラナビゲータの画像を目視で比較し, 恒星の配置のパターンからマッチングを行った. 図 6.11 にステラナビゲータで再現した視野と実際の視野を示す. こちらは USNO カタログを用いて 13 等程度までの恒星を表示した.



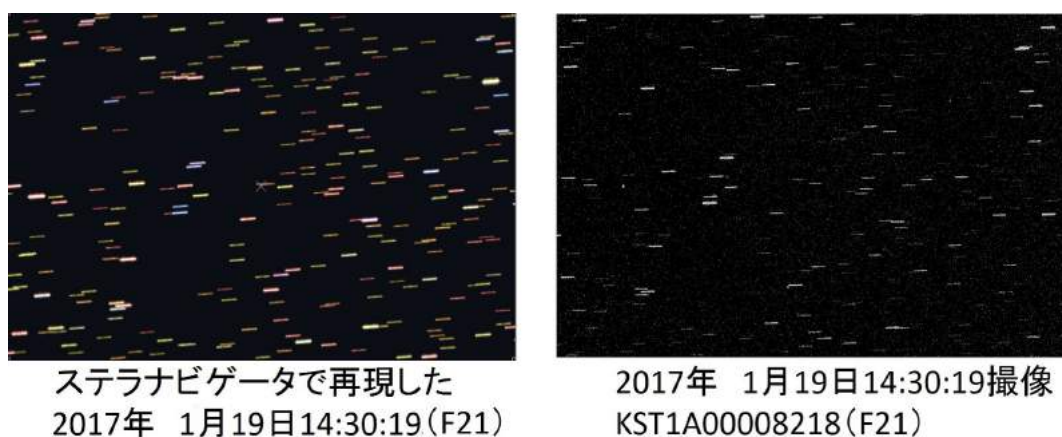


図 6.11: ステラナビゲータと観測画像の比較

## 点像の位置計算

マッチング後, 正体の判明した恒星の Azimuth, Elevation に点像までの距離を加え点像の Azimuth, Elevation を計算する. 以下に計算結果を示す.

表 6.3: 点像位置計算に用いた恒星と点像の位置

時刻	点像位置	使用した恒星	背景の恒星 Az	背景の恒星 EL	点像 Az	点像 EL
UTC			deg	deg	deg	deg
12:29:47.70(1/18)	試験観測 左	USNO-A2.0 825-1908302	352.52	47.86	352.51	48.08
12:29:47.70(1/18)	試験観測 右	USNO-A2.0 825-1904122	352.89	48.07	352.86	48.05
14:30:19.13	F21 左	USNO-A2.0 825-5964499	353.60	48.50	353.60	48.46
14:30:19.13	F21 真ん中 左	USNO-A2.0 825-5941470	354.08	48.52	354.06	48.52
14:30:19.13	F21 下	USNO-A2.0 825-5921160	354.43	48.19	354.44	48.18
14:30:19.13	F21 右	USNO-A2.0 825-5964084	355.18	48.81	355.15	48.82
14:31:31.50	F22 左	USNO-A2.0 825-5902566	355.14	48.84	355.14	48.88
14:31:31.50	F22 真ん中	USNO-A2.0 825-5855197	355.98	48.70	355.98	48.54
14:36:38.33	F23	USNO-A2.0 825-5863771	357.79	48.28	357.85	48.27

### 6.3.2 既知の物体の位置の計算

既知の物体の位置計算には JSpOC の TLE による軌道情報カタログを用いた. TLE の入手先として本研究では SpaceTrack のホームページ (<https://www.space-track.org/#/Landing>) を用いた. こちらの WEB ページでは, 日にち時刻を入力することで任意の時間に宇宙空間に存

在していた人工衛星, スペースデブリの TLE を表示することが出来る. TLE 入手後, 得られた TLE から観測時当時に観測視野に存在した人工衛星, スペースデブリの Azimuth, Elevation を計算するプログラムを自作し, 分布図を作成した. この位置計算プログラムは Python を用いて作成した. アルゴリズムは第二章の衛星の位置計算で示したものとなる. 尚, 恒星時は国立天文台の WEB サイト (<http://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/cande/gst.cgi>) から取得した. 摂動は J2 項 (地球の扁平性によるもの) のみを考慮した. 以下に計算結果を示す.

表 6.4: TLE から計算した観測時に観測視野周辺に存在した物体2017 年 1 月 18 日

観測視野付近の静止物体	TLE から計算した Az	TLE から計算した EL
	deg	deg
MTSAT2	352.58	48.03
SKYMUSTER2	352.96	48.04

表 6.5: TLE から計算した観測時に観測視野周辺に存在した物体2017 年 1 月 19 日

観測視野付近の静止物体	TLE から計算した Az	TLE から計算した EL
	deg	deg
BEIDOU G7	353.65	48.40
SUPERBIRD 7(C2)	354.42	48.09
CHINASAT 5A	355.22	48.74
WINDS	356.03	48.48
APSTAR 9	357.77	48.20

### 6.3.3 同定

点像の位置の計算結果と TLE から計算した周辺衛星の位置を用いて撮像物体の同定を行った. 本研究では 2 重チェックのため 4 章で述べた JAXA 軌道情報サイトを用いた. 具体的には TLE からの計算によって判明した観測視野周辺に存在していた衛星について, JAXA サイトを用い各衛星の Az, El の計算を行った. 以上 3 つの値を比較することで最終的な識別を行った. 分布図による比較を図 6.12 及び図 6.13 に示す.

図を見比べると計算値とほぼ同じ位置に静止物体が撮像されていることが確認できる. また表の数値を見比べると図の object2 以外に関しては, Azimuth で 0.1 度以下, Elevation で



0.5 度以下の精度で点像と衛星の位置が一致していることが確認できた．また表の F21 右の物体と F 2 2 左の物体図では object4 は同一の衛星であることが判明した．まとめると本研究の観測システムでアメリカ軍の持っているデータ同等レベルのデータを得ることに成功していることが確認できた．

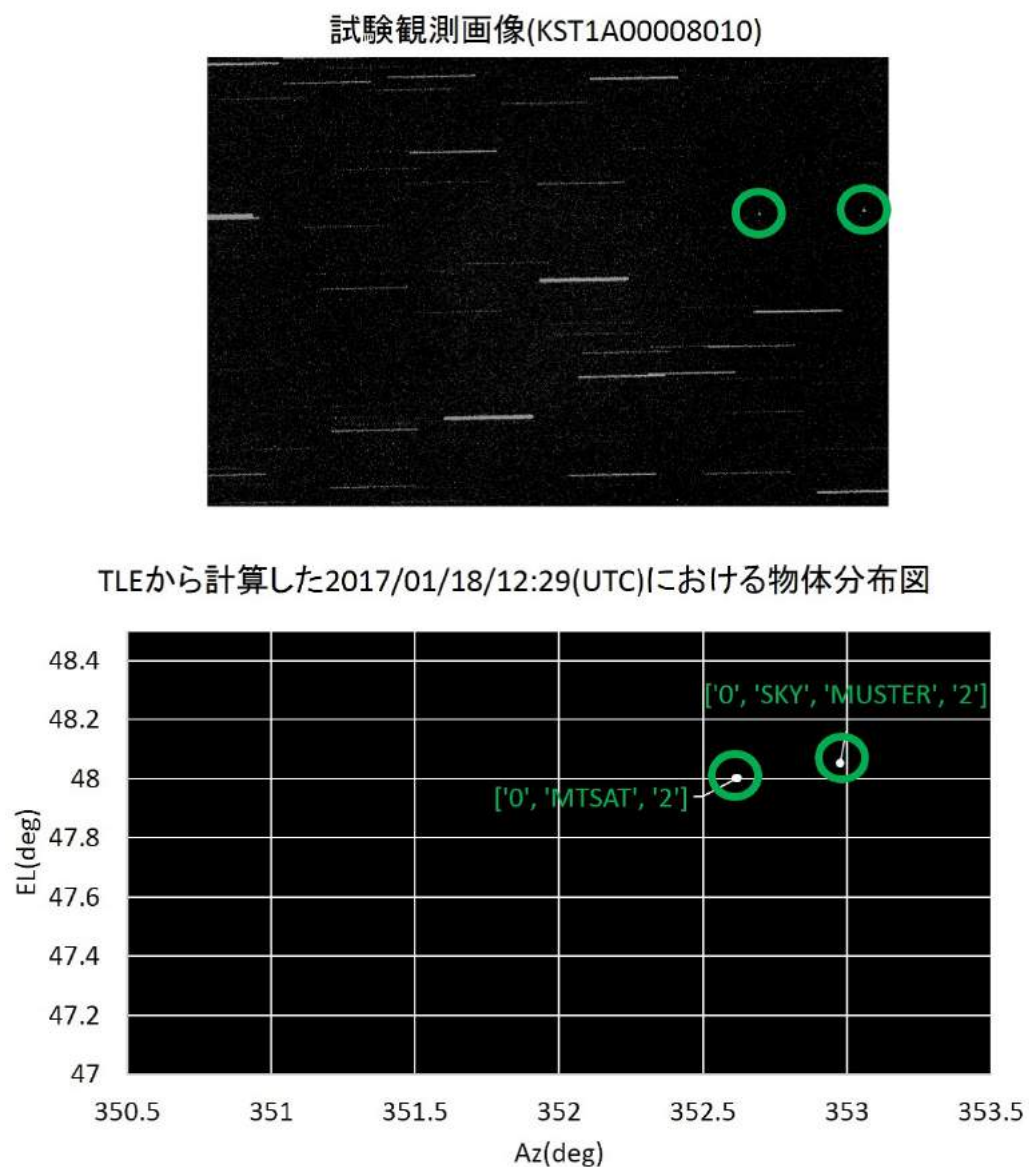


図 6.12: 観測画像と TLE から計算した周辺衛星の分布図の比較 1

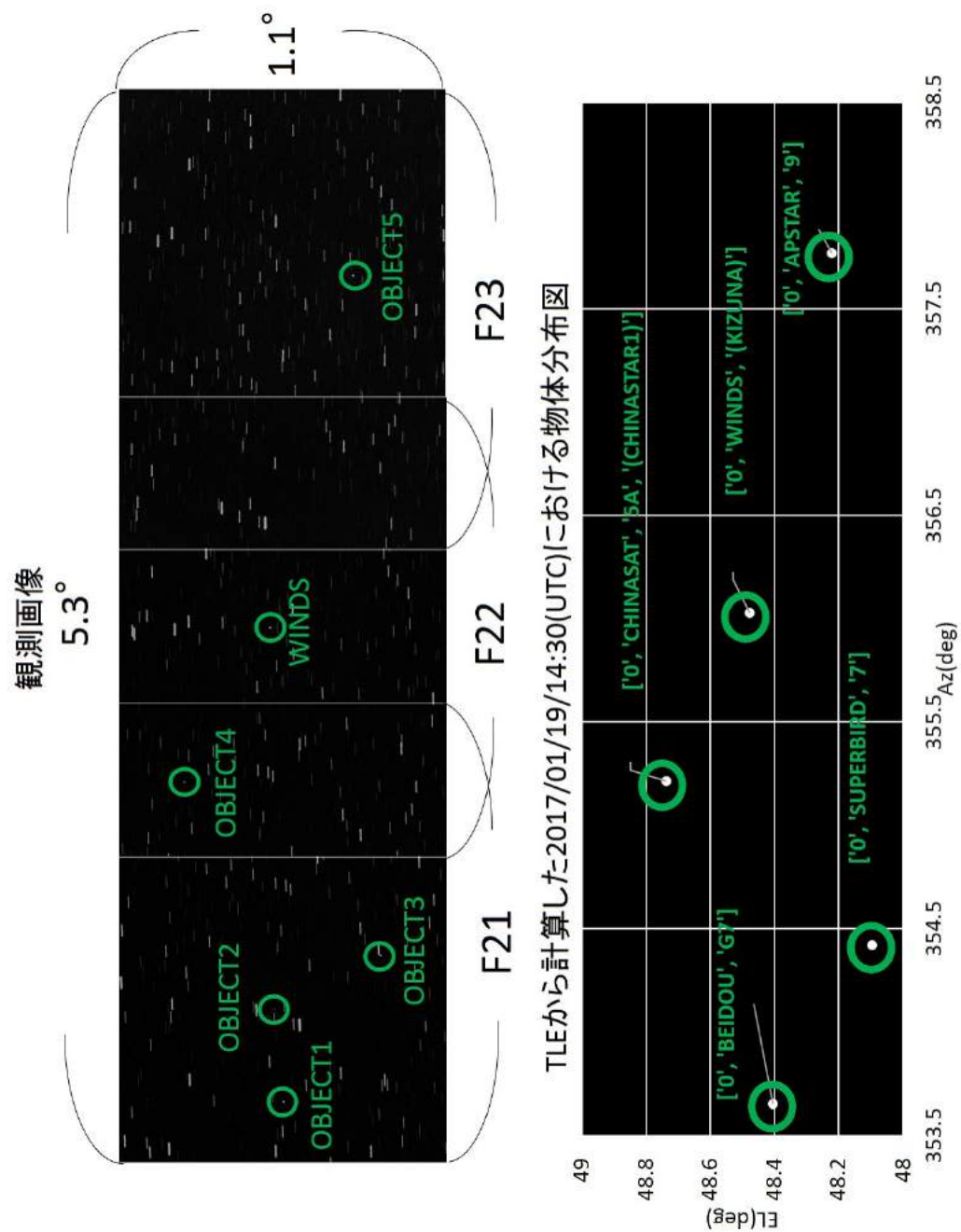


図 6.13: 観測画像と TLE から計算した周辺衛星の分布図の比較 2

表 6.6: 観測時における TLE 計算値と JAXA サイト計算値 1

観測視野付近の物体	TLE_Az	TLE_EL	JAXA サイト Az	JAXA サイト El
	deg	deg	deg	deg
MTSAT2	352.58(表 6.4)	48.03(表 6.4)	352.57	48.06
SKYMUSTER2	352.96(表 6.4)	48.04(表 6.4)	172.93	48.09

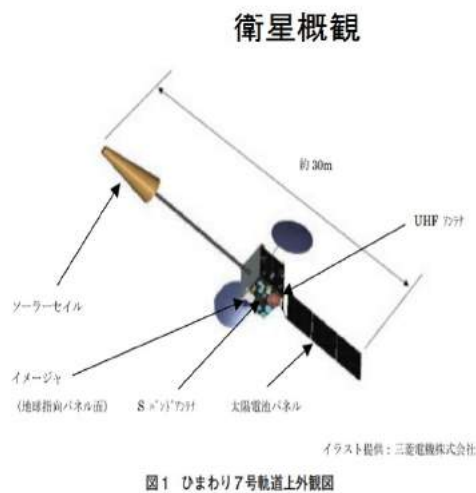
表 6.7: 観測時における TLE 計算値と JAXA サイト計算値 2

観測視野付近の物体	TLE_Az	TLE_EL	JAXA サイト Az	JAXA サイト El
	deg	deg	deg	deg
BEIDOU G7	353.65	48.40	353.60	48.45
SUPERBIRD 7	354.42(表 6.5)	48.09(表 6.5)	354.54	48.15
CHINASAT 5A(F21)	355.22(表 6.5)	48.74(表 6.5)	355.17	48.78
CHINASAT 5A(F22)	355.22(表 6.5)	48.74(表 6.5)	355.17	48.78
WINDS	356.03(表 6.5)	48.48(表 6.5)	355.98	48.52
APSTAR 9	357.77(表 6.5)	48.20(表 6.5)	357.72	48.25

### 6.3.4 撮像衛星の詳細情報

同定された衛星の詳細情報を以下に示す.

- ・ MTSAT 2(HIMAWARI7)



**衛星スペック**

国籍	日本
種類	気象
バスサイズ	2.4m × 2.6m × 2.6m
太陽電池サイズ	10m × 2.6m
質量	4650kg

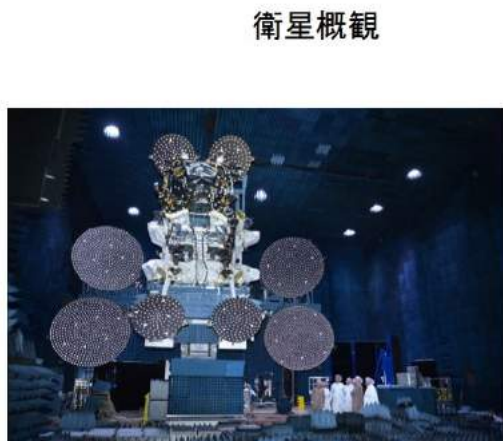
気象衛星センター報告書より引用

<http://www.data.jma.go.jp/mscweb/technotes/msctechrep49-4.pdf>

2018/01/13アクセス

図 6.14: MTSAT 2 の外観とスペック

- ・ SKY MUSTER 2



**衛星スペック**

国籍	オーストラリア
種類	通信
バスサイズ	不明
太陽電池サイズ	不明
質量	6400kg

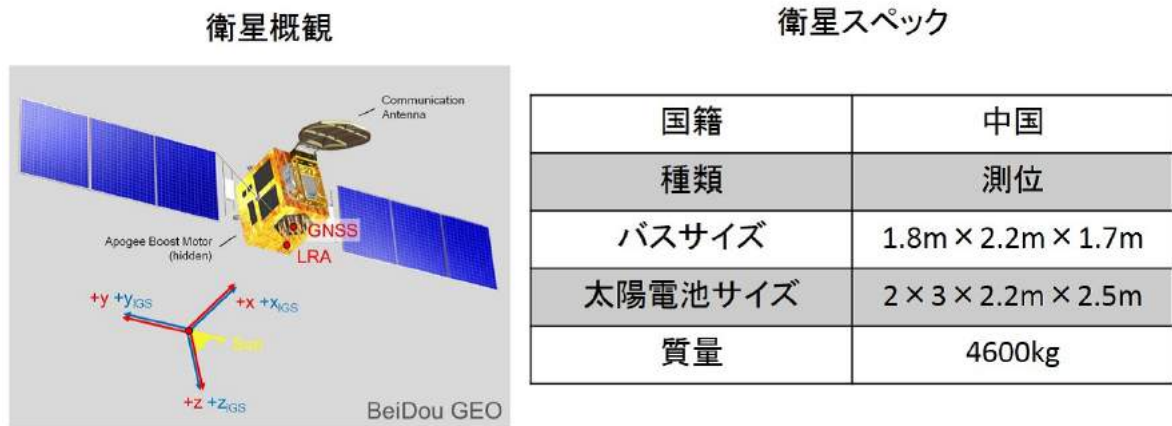
ニュースサイトより引用

<http://blog.activ8me.net.au/2016/08/02/sky-muster-ii-satellite-launch/>

2018/01/13アクセス

図 6.15: SKYMUSTER 2 の外観とスペック

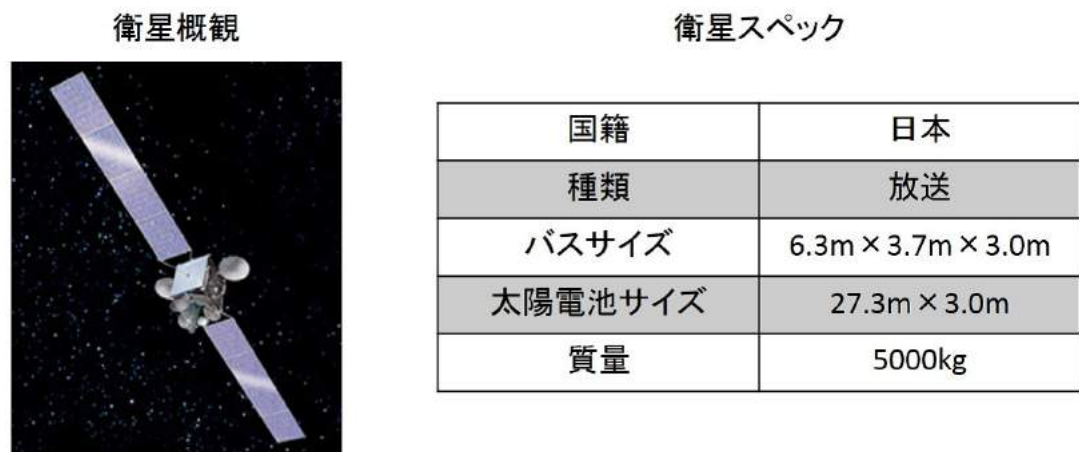
・ BEIDOU G7



IGS(International GNSS service)サイトより引用  
[http://mgex.igs.org/IGS\\_MGEX\\_Status\\_BDS.php](http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.php)  
 2018/01/13アクセス

図 6.16: BEIDOU G7 の外観とスペック

・ SUPERBIRD 7(C2)



ニュースサイトより引用 <http://news.livedoor.com/article/detail/3776750/>  
 2018/01/13アクセス

図 6.17: SUPERBIRD 7(C2) の外観とスペック

・ CHINASAT 5A

衛星概観



衛星スペック

国籍	中国
種類	通信
バスサイズ	1.8m × 2.0m × 2.8m
太陽電池サイズ	不明
質量	2984kg

運用会社サイトより引用

<http://english.csat.spacechina.com/n931903/c932179/content.html>

2018/01/13アクセス

図 6.18: CHINASAT 5A の外観とスペック

・ WINDS

衛星概観



衛星スペック

国籍	日本
種類	通信
バスサイズ	3m × 2m × 8m
太陽電池サイズ	9.8m × 2.3m
質量	4800kg

JAXAサイトより引用

2018/01/13アクセス

[http://www.jaxa.jp/countdown/f14/overview/kizuna\\_j.html](http://www.jaxa.jp/countdown/f14/overview/kizuna_j.html)

図 6.19: WINDS の外観とスペック



・ APSTAR 9

衛星概観



衛星スペック

国籍	中国
種類	通信
バスサイズ	2.36m × 2.10m × 3.6m
太陽電池サイズ	縦6m
質量	5200kg

ニュースサイトより引用  
2018/01/13アクセス

<http://spaceflight101.com/spacecraft/apstar-9/>

図 6.20: APSTAR 9 の外観とスペック

## 6.4 画像の重ね合わせ

### 6.4.1 重ね合わせ結果

静止物体の動きを見るために画像の重ね合わせによる解析を行った。同じ視野について複数枚の画像を足し合わせることで撮像物体の位置の時間変動を視覚化することが出来る。今回、重ね合わせは F21, F22, F23 それぞれの視野について、各 5 枚の画像を用いて行った。5 枚の内訳は 10s 露出が 3 枚、20s 画像が 2 枚である。重ね合わせは IRAF の imcomb 機能を用いて行った。図 6.21 と図 6.22, 図 6.23 にそれぞれの視野について重ね合わせた画像を示す。また図 6.24 に連続撮像した F22 を重ね合わせた様子を示す。

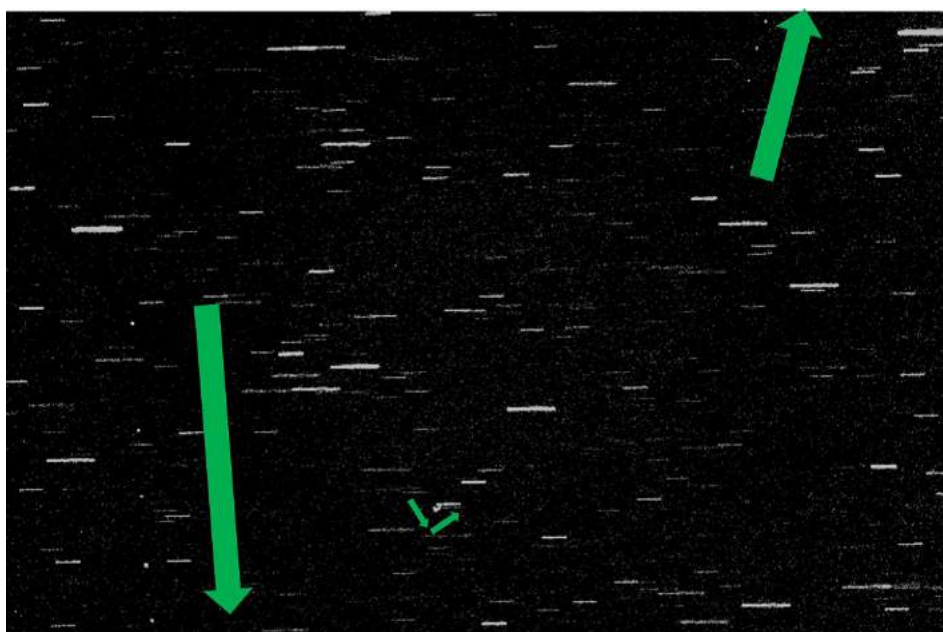


図 6.21: F21 を 5 枚重ね合わせた様子

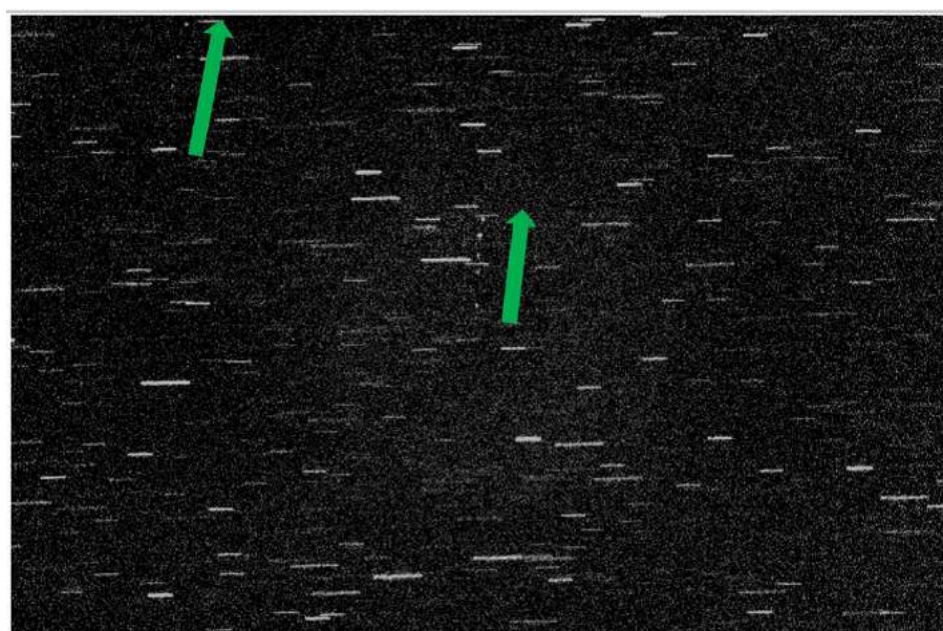


図 6.22: F22 を 5 枚重ね合わせた様子



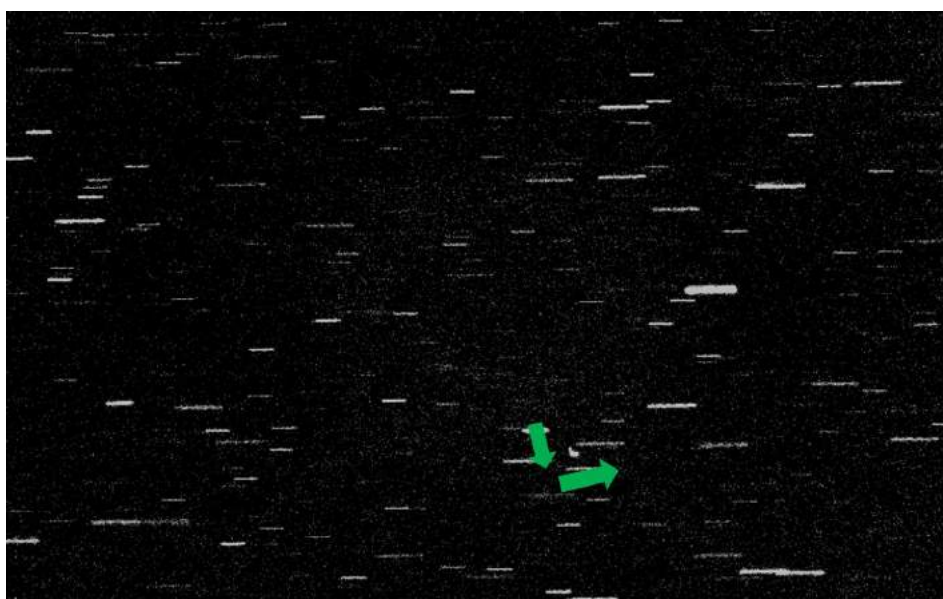


図 6.23: F23 を 5 枚重ね合わせた様子

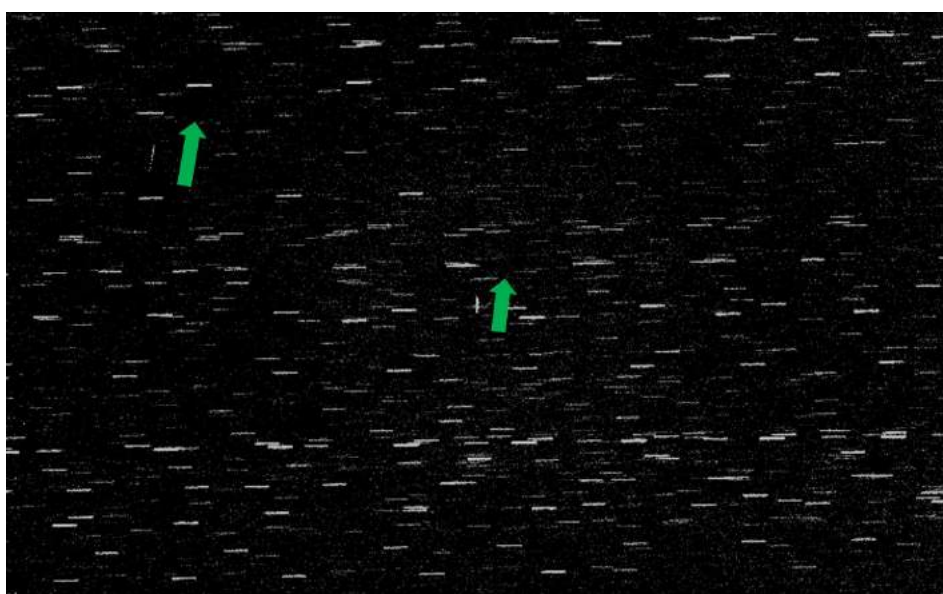


図 6.24: 連続撮像した F22 を 5 枚重ね合わせた様子

図 6.21 と図 6.22, 図 6.23 に関しては重ね合わせに用いた画像の最初の 1 枚と最後の 1 枚の撮像時間の差は 1 時間 10 分程度であった。つまり図 6.21 と図 6.22, 図 6.23 での点像位置の変動は 1 時間 10 分の間に起きたものである。同様に図 6.24 は 10 分程度の間に起きた移動である。これらの画像を見ると静止軌道上に存在する物体であっても実際には静止せず移動をしていることが確認できた。

#### 6.4.2 静止物体位置変動の解析

静止物体の移動原因を探るため移動量の評価を行った。図 6.24 の WINDS の移動量を計算してみると, EI について 10s でおよそ  $0.0261^{\circ}$  変動していることが分かった。この移動量を評価するために今回, NICT ワイヤレスネットワーク総合研究センター宇宙研究室所属で WINDS を担当している浅井敏男氏に当時の WINDS に関する情報の提供を依頼した。その結果本研究の観測当時, WINDS は燃料節約のため南北方向に関して衛星位置の制御をしていなかったことが分かった。そこで JAXA 軌道情報サイトにて観測日当時の WINDS の予測位置の変化の計算を行った。計算結果を図 6.25 に示す。

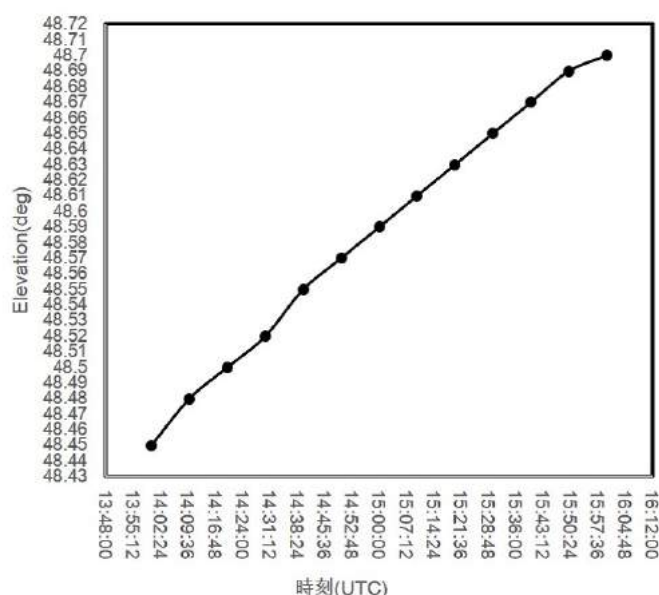


図 6.25: 2017/01/19 WINDS の Elevation 時間変化

このグラフを見ると 10s で  $0.0261^{\circ}$  の移動はおおよそ妥当な値であることが確認できる。また観測日前日の WINDS の TLE を確認したところ、軌道傾斜角が  $0.5623^{\circ}$  であることが確認できた。一般に静止軌道上の物体が微小な軌道傾斜角を持つと、1 日周期で 8 の字運動と呼ばれる運動を行うことが知られている。以上のことからこの WINDS の位置の時間変動は 8 の字運動の一部であると考えることが出来る。他の衛星の軌道傾斜角についても調べると、CHINASAT 5A が  $0.9307^{\circ}$ 、BEIDOU G7 が  $1.4819^{\circ}$ 、APSTAR 9 が  $0.0263^{\circ}$ 、SUPERBIRD 7 が  $0.0117^{\circ}$ 、SKYMUSTER 2 が  $0.0154^{\circ}$ 、MTSAT 2 が  $0.0352^{\circ}$  であることが分かった。表 6.8 に各衛星の軌道傾斜角のまとめを示す。

表 6.8: 2017/01/18TLE の各衛星軌道傾斜角

衛星名	軌道傾斜角
	deg
MTSAT 2	0.0352
SKYMUSTER 2	0.0154
BEIDOU G7	1.4819
SUPERBIRD 7	0.0117
CHINASAT 5A	0.9307
WINDS	0.5623
APSTAR 9	0.0263

以上より、BEIDOU G7、CHINASAT 5A、WINDS の移動は人工的な原因によるものではないことが推測される。他の衛星に関しては重ね合わせ画像の動きが明らかに人工的なものであること、衛星の軌道傾斜角が全て  $0.1^{\circ}$  以下に抑えられていることから、南北制御による動きが観測されていたと考えることが出来る。そのため次期技術試験衛星投入の際には、制御のされていなかった BEIDOU G7、CHINASAT 5A の位置に注意する必要がある。

## 6.5 測光

各衛星の詳細情報を得るために第 3 章で述べた等級による解析を行う。任意の天体の等級は第 3 章のポグソンの関係式の通り、既知の天体（標準星）の等級、フラックス、等級が未知

の天体のフラックスから計算することが出来る。既知天体の等級はステラナビゲータの恒星カタログにて確認することが出来る。そのため等級解析の準備として残る既知天体 (恒星), 未知天体 (点像) のフラックスを調べる測光作業を行った。

### 6.5.1 恒星 (線像) の測光

本研究の観測手法は恒星追尾を止めて撮像する手法のため、恒星が線上に伸びてしまい天文学で用いられる通常の測光方法では恒星の測光を行うことは出来ない。そのため本研究では、IRAF の `imstat` パッケージを用いた線像測光手法を考案した。手順を以下に述べる。まず IRAF の `imastat` 機能を用いて恒星周辺の CCD カウント値の合計値を計算する。`imstat` 機能では X 軸範囲, Y 軸範囲を指定し, 任意の範囲の平均カウント値, 総ピクセル数を計算することが出来る。その二つの値を乗ずることで指定範囲の合計カウント値を計算する。この値には当然バックグラウンドのカウント値も含まれているため, これを差し引かなければならない。そこでシーイングの計算の時に用いた `imexam` 機能で点像周辺のスカイ値 (バックグラウンド値) を測定する。このスカイ値に総ピクセル数を乗じ, その値を指定範囲の合計カウント値から差し引くことで, 線像のみの総カウント値を計算することが出来る。等級計算に用いる標準星は出来るだけ明るいものを用いることで測光精度を高めることが出来る。そのため本研究では標準星を観測画像内の出来るだけ明るい恒星から選ぶこととした。恒星カタログは USNO とティコ第二を用いたが, ティコ第二の方が等級値の収録数が多かったため, 本論文ではティコ第二を用いた結果を提示する。

### 6.5.2 静止物体 (点像) の測光

点像の測光は通常の天文学の世界で用いられる手法で測光することが出来る。これは IRAF の `phot` パッケージで行った。`phot` 機能は点像に関して上記の線像測光の時にを行った, 総カウント値の計算, バックグラウンド値の計算, その差し引きを自動で行うものである。具体的な手順を以下に述べる。まず測光範囲を指定する。測光範囲は円となるため半径の値で指

定する。値は点像の端までもれなくカウントするように点像の FWHM の 3 倍の値とした。

ただし点像の近くに恒星がある場合は恒星のカウント値がカウントされないか注意する必要がある。次にスカイの値の計算であるが, phot ではスカイの調査範囲をドーナツ状に指定するようになっている。図 6.26 に phot の測光範囲の概念図を示す。このドーナツの内径を 3FWHM とし, ドーナツの幅を 5pix として設定した。以上の手順で点像の測光を行った。なお同定できていない unknown 物体については像が縦に伸びているため, 恒星の測光手法と同じ方法で測光を行った。

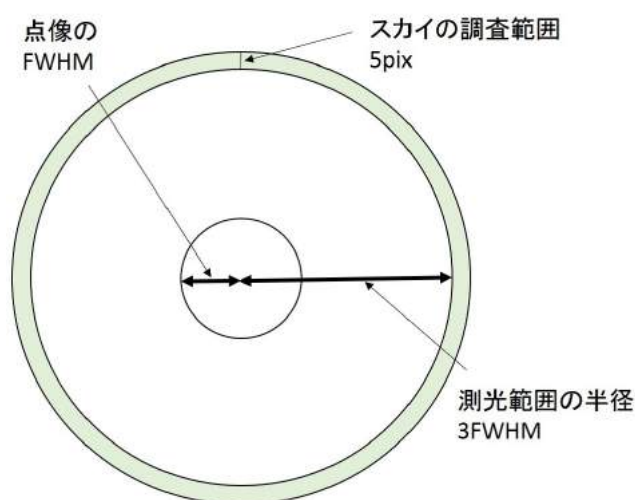


図 6.26: phot 測光範囲概念図

### 6.5.3 測光結果

標準星の測光結果を表 6.9 に示す。またそれぞれの衛星について phot を実行した結果の 1 例を図 6.29 から図 6.33 に示す。但し MTSAT 2, SKYMUSTER 2 に関しては露出時間 50s, それ以外の衛星については露出時間 10s のものである。

表 6.9: 標準星測光情報

画像番号	標準星名	等級 (USNO)	等級 (ティコ第二)	総カウント値
KST1A00008010	USNO-A2.0 825-1944948, TYC4790-811-1	9.00	8.88	6797280
KST1A00008218	USNO-A2.0 825-5979862, TYC4854-2411-1	8.51	8.56	2372457.6
KST1A00008219	USNO-A2.0 825-5820277, TYC4841-2780-1	9.28	9.09	1414584

画像番号	標準星名	等級 (USNO)	等級 (ティコ第二)	総カウント値
KST1A00008222	USNO-A2.0 825-5921160, TYC4858-114-1	9.63	9.04	1817517.8

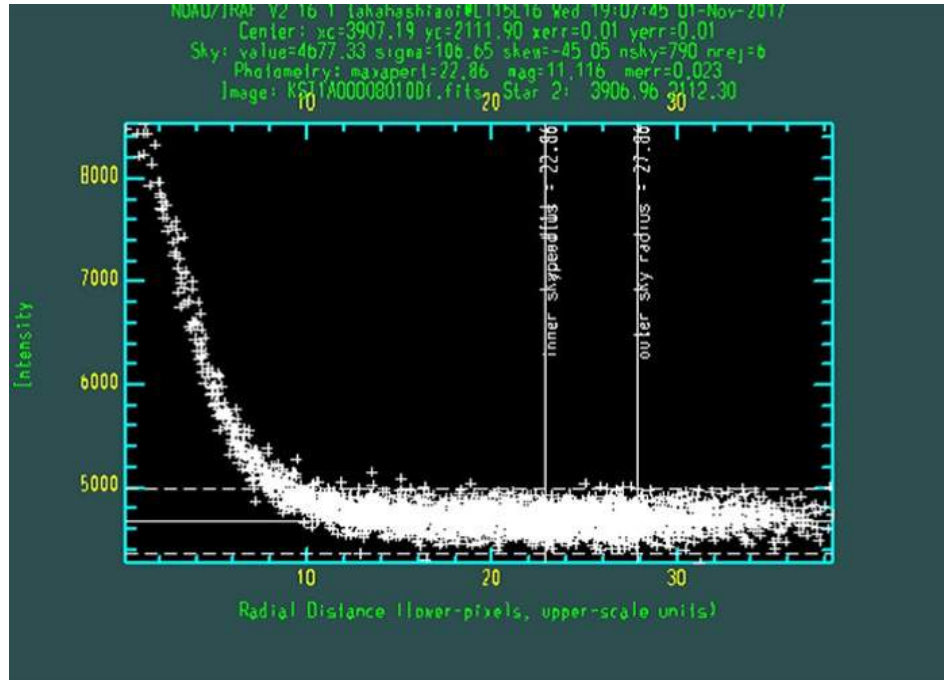


図 6.27: MTSAT 2 測光結果

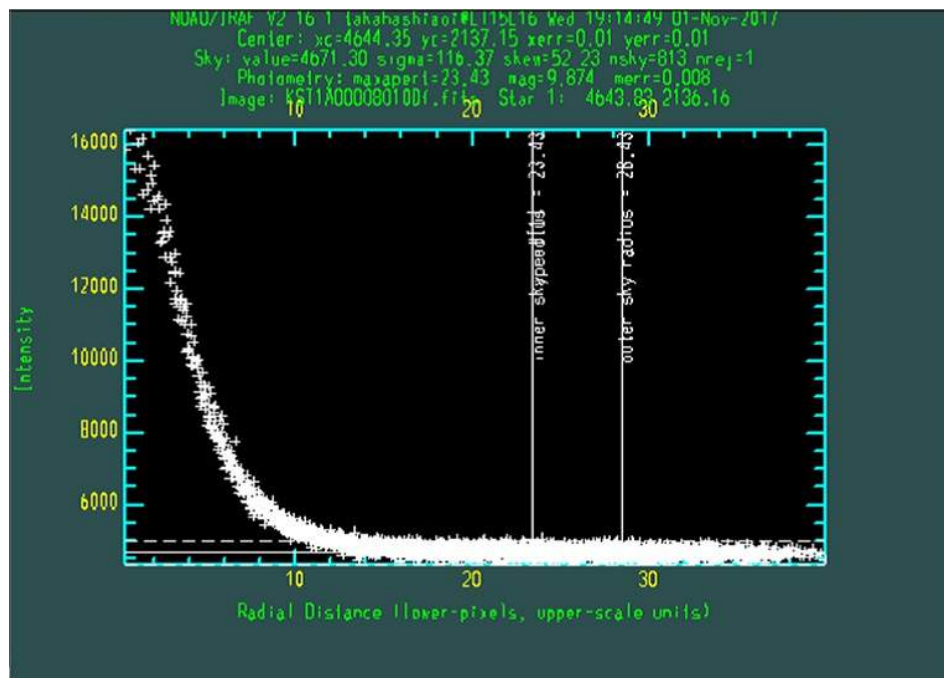


図 6.28: SKYMUSTER 2 測光結果



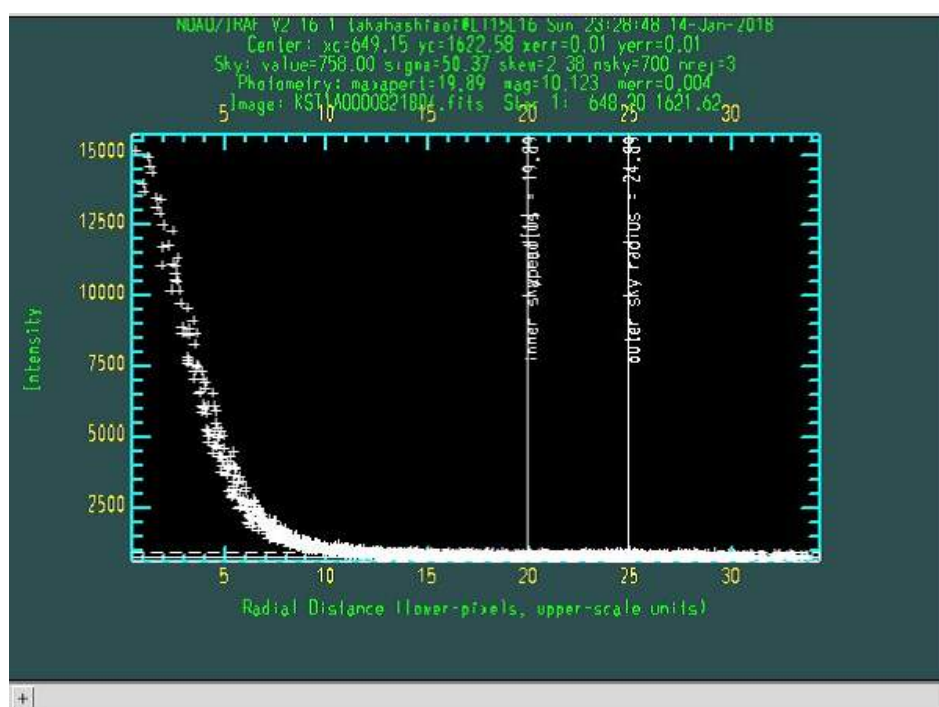


図 6.29: BEIDOU G7 測光結果

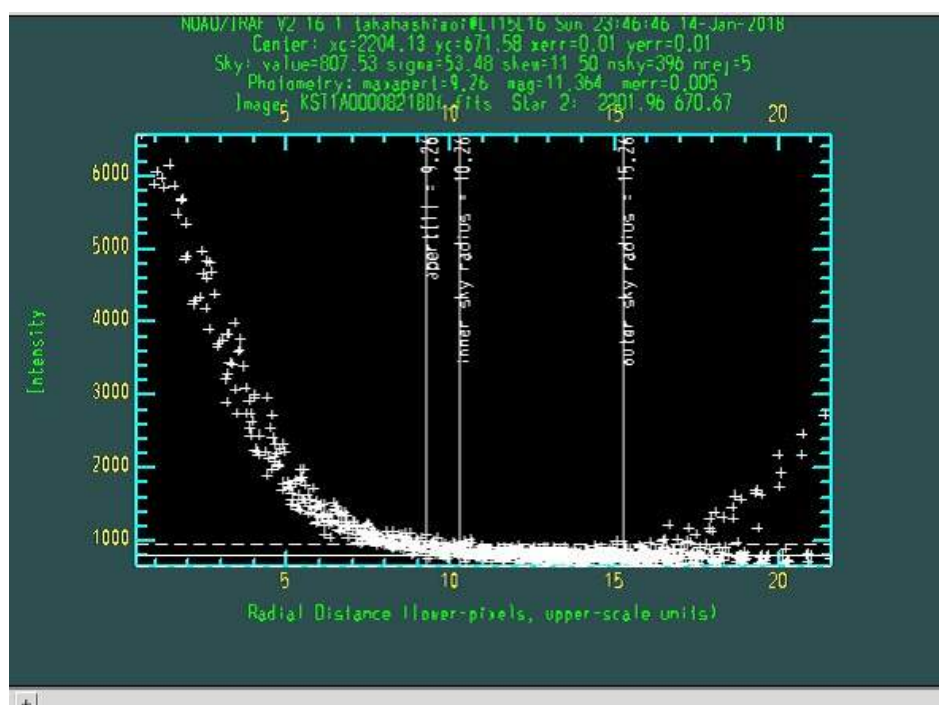


図 6.30: SUPERBIRD 7 測光結果

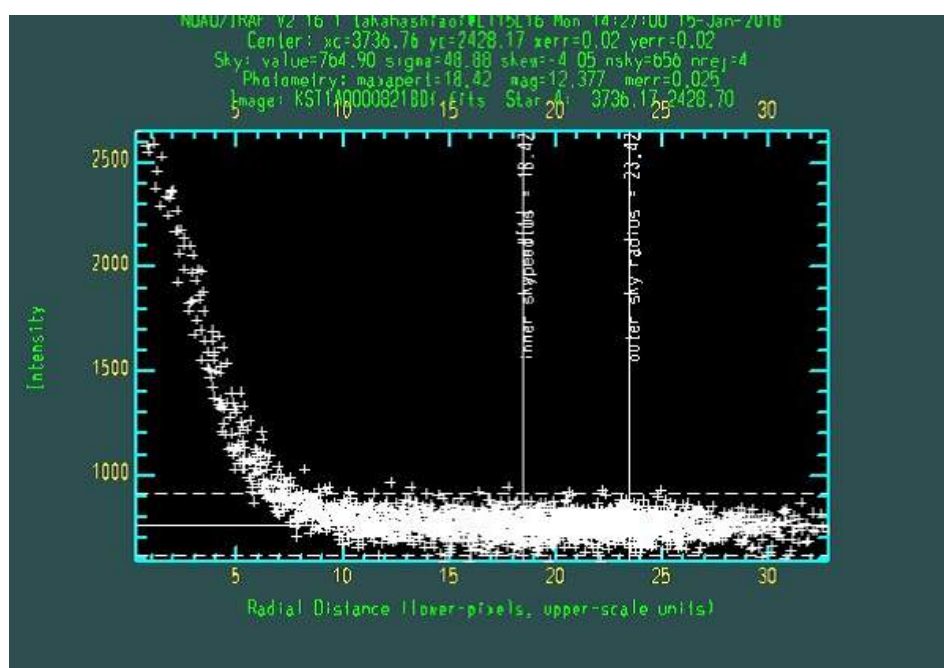


図 6.31: CHINASAT 5A 測光結果

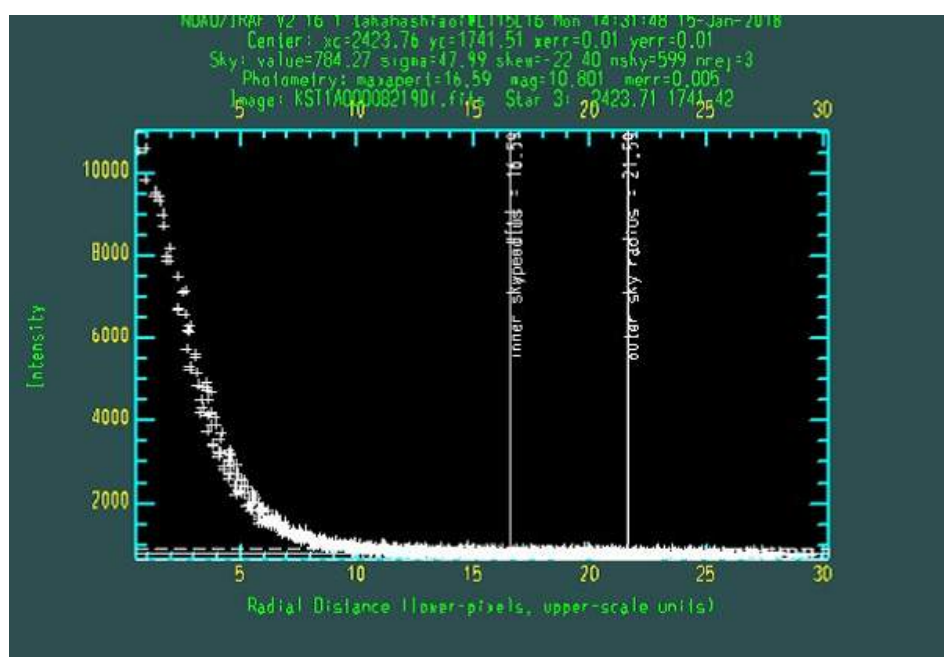


図 6.32: WINDS 測光結果



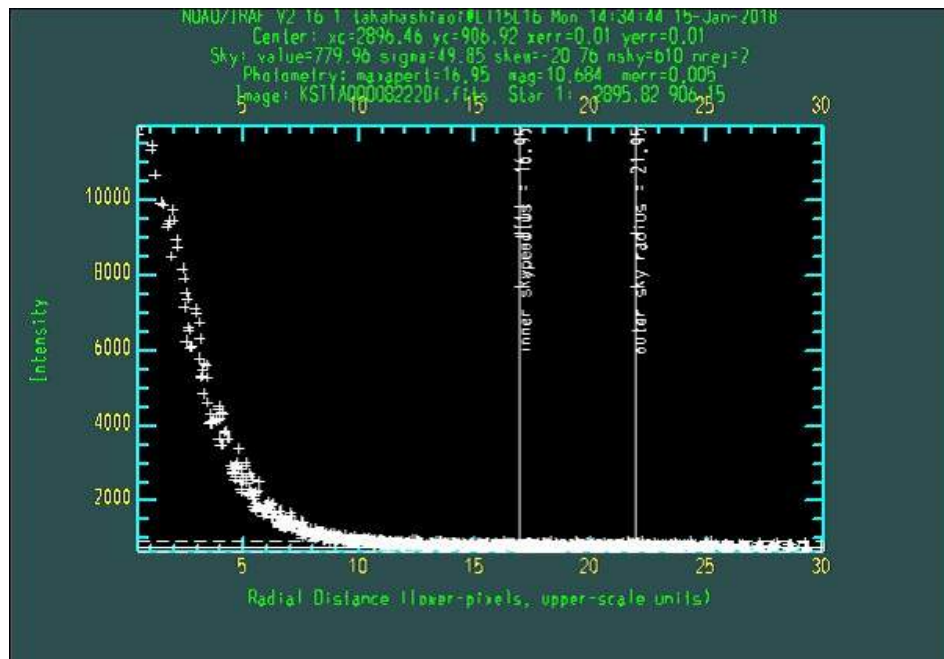


図 6.33: APSTAR 9 測光結果

グラフの縦軸が CCD カウント値であり、横軸がピクセル座標値を表している。また図のグラフ上に描かれている縦線はそれぞれドーナツの内径、外径を示している。いずれの像もガウス分布で近似されており、周りの恒星のカウント値を含まず正しく測光されていることが確認できる。

## 6.6 等級計算

### 6.6.1 等級計算結果

以上の測光値を用いてポグソンの式より見かけの等級の計算を行った。表 6.10 に 14:30 前後の露出時間 10s 画像での計算結果を示す。但し、MTSAT 2 と SKYMUSTER 2 に関しては 1/18 日の露出時間 50s 画像での計算結果である。

表 6.10: 各物体の等級

物体名	観測時刻 (UTC)	カウント値	見かけの等級
MTSAT2	12:29:31	357896	11.8
SKYMUSTER 2	12:29:31	1123015	10.6
BEIDOU G7	14:30:19	892728.8	9.60
unknown 物体	14:30:19	74466	12.3
SUPERBIRD 7	14:30:19	297345.5	10.8
CHINASAT 5A	14:31:31	104976	12.0
WINDS	14:31:31	478589.6	10.3
APSTAR 9	14:36:38	532792.1	10.4

いずれの物体も人間の目で認識することが出来る限界の6等級よりもはるかに暗い等級値となっている。そこで次に本観測システムでの検出限界の計算を行った。

## 6.6.2 観測限界について

### 限界等級の計算

本観測での限界等級の計算を行った。限界等級とはどの程度暗い星まで見えているか、つまり何等級の星まで認識することが出来るかを表す指標である。本研究では画像として記録しているので何等級の星までが画像に写っているかを計算した。撮像データの場合、限界等級は天体の測光値 (Signal) が雑音 (Noise) の何倍かという比  $S/N$  によって決められる。天文学で用いられる  $S/N$  の値は 2, 5, 10 などである。本研究ではスペースガードセンターの先行研究に習い、 $S/N=5$  を限界等級として定義した。そのため  $S/N=5$  となる星の等級をポグソンの関係式を用い計算した。但し限界等級はシーイングの影響も受けるため平均値の計算も行った。表 6.11 に露出時間 10s,  $S/N=5$  での限界等級の計算結果を示す。

表 6.11: 限界等級計算結果

画像名	限界等級
KST1A00008218	15.5
KST1A00008219	15.7
KST1A00008222	16.3
平均	15.8

平均するとおよそ 16 等であることが分かった。これはステラナビゲータで再現した恒星の等級値と比較しても遜色ない値であり、また日本スペースガード協会の過去の報告値では口径 1m 望遠鏡で 18.7 等であったので、およそ妥当な値である。

#### 検出限界サイズの計算

限界等級から検出限界サイズへの変換を行った。これは第 3 章で述べた等級の理論式から計算することが出来る。図 6.34 と図 6.35 に今回観測された衛星と鹿島の平均距離 35851.477km において phase angle が  $25^\circ$  , 反射率が 0.1 と仮定した場合の lambert 反射の球と板の等級と大きさの理論的な関係を示す。

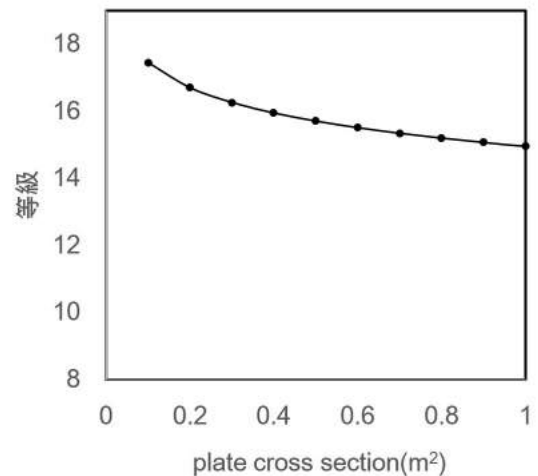
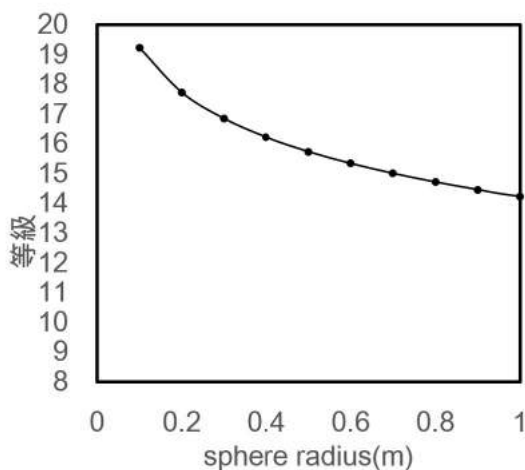


図 6.34: 35851.48km にある乱反射球の等級

図 6.35: 35851.48km にある板の等級

グラフより今回の観測での検出限界サイズは球で半径 0.45m 程度, 板で  $0.4m^2$  程度の大きさであることが分かった. 今回の観測ではこれ以上の大きさの物体は全て捉えられているということになる.

### 6.6.3 等級と時間の関係

今回の観測中での等級の時間変化を表 6.12 に示す. 但し, 表の 1 行目は F11 から F33 までの撮像を 1 周期とした時の周回数を表している.

表 6.12: 等級の時間変化

衛星名	1 週目	2 週目	3 週目	4 週目	5 週目
BEIDOU G7	9.600	10.22	10.53	10.70	11.16
unknown 物体	12.30	-	-	-	-
SUPERBIRD 7	10.80	10.34	11.23	11.09	11.36
CHINASAT 5A	12.00	11.79	11.77	11.66	11.62
WINDS	10.30	10.74	10.80	10.74	11.10
APSTAR 9	10.40	10.36	10.20	10.67	10.33

この表から等級の値が時間とともに変動していく様子が確認できる. これは第三章で述べた phase angle の影響である. そこで各衛星の phase angle が各時間にどの程度の数値だったのか検証を行った.

### 6.6.4 等級と phase angle の関係

等級と phase angle を結びつけるために phase angle の計算を行った. phase angle は第三章で述べたように, アメリカ空軍の論文 [26] により定義されている. phase angle の計算には鹿島の位置ベクトル, 衛星の位置ベクトル, 太陽の位置ベクトルが必要である. 鹿島の位置ベクトル, 衛星の位置ベクトルは同定の章で用いた位置計算プログラムにより計算した. 太陽の位置ベク

トルはNASA ジェット推進研究所のHORIZONZシステム (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) を用いてデータ取得した。このシステムでは任意の時間に任意の場所から見た任意の天体の位置ベクトルを計算することができる。今回は観測時当日の地心から見た太陽の位置ベクトルの値を取得し、計算に用いた。以下に計算結果を示す。

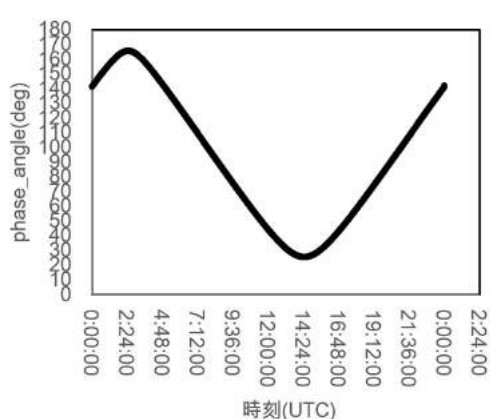


図 6.36: 2017/01/19 BEIDOU G7 phase angle の変化

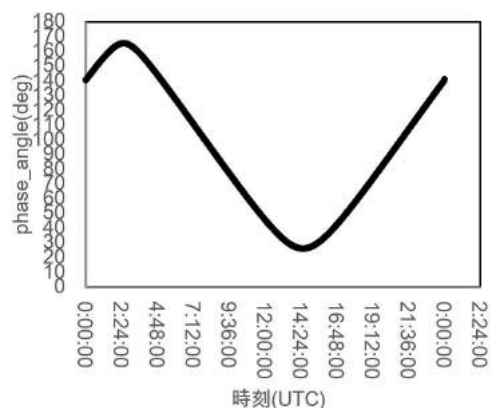


図 6.37: 2017/01/19 SUPERBIRD 7 phase angle の変化

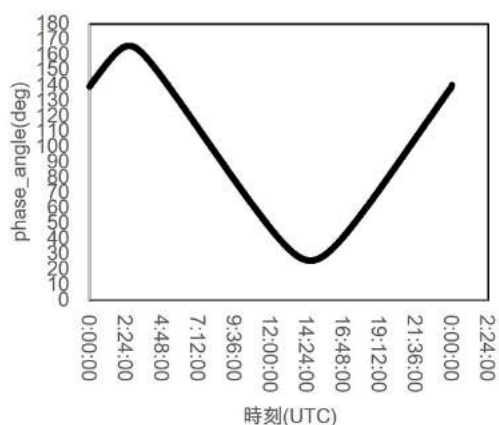


図 6.38: 2017/01/19 WINDS phase angle の変化

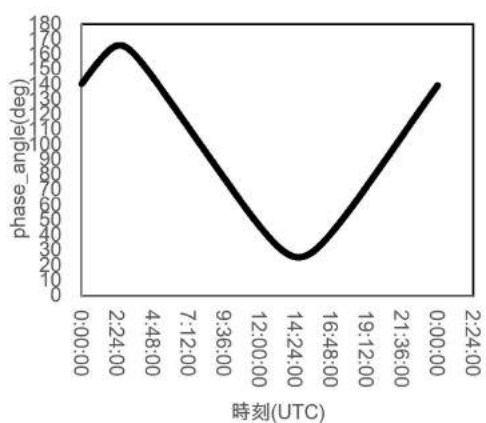


図 6.39: 2017/01/19 CHINASAT 5A phase angle の変化

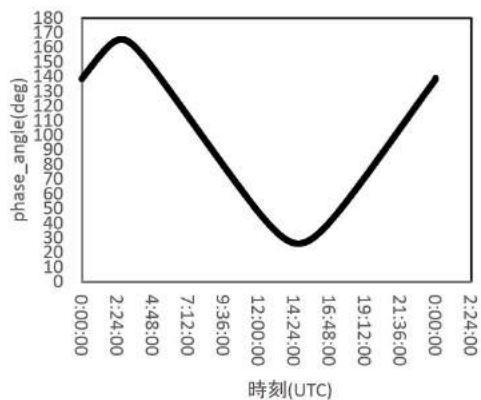


図 6.40: 2017/01/19 APSTAR 9 phase angle の変化

グラフを見るとどの衛星もおよそ  $25^{\circ}$  から  $165^{\circ}$  の間で値が変化していることが分かった。これは鹿島、衛星、太陽の位置の関係なので、衛星が鹿島の直上に存在しない限り phase angle が0にはならないことを示している。最後に今回の観測で得た、各衛星の phase angle と等級の関係を図 6.41 に示す。

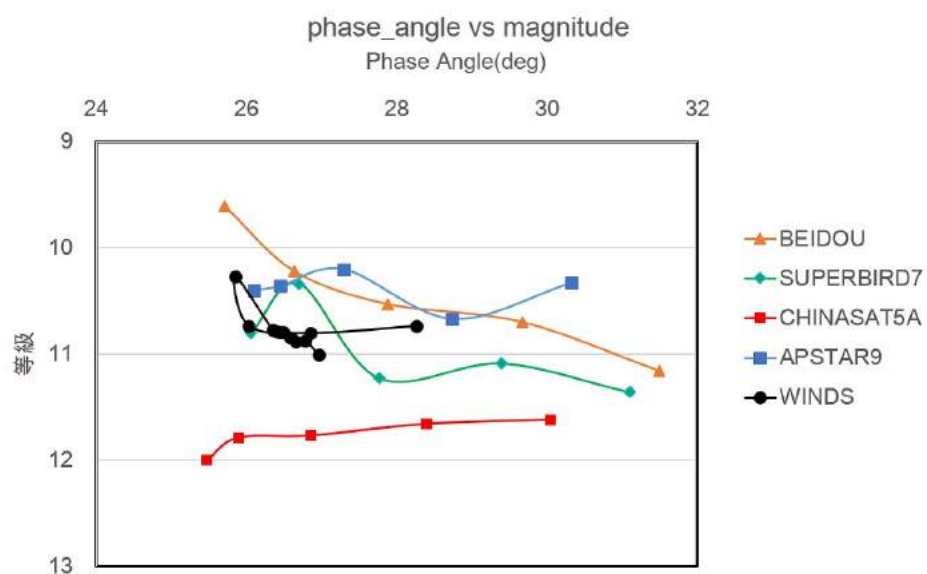


図 6.41: 静止衛星の等級と phase angle の関係

このグラフを見ると途中で等級の大きさの順位が入れ替わっている所も見られる。また WINDS に関しては特徴的なループ状の等級変化が表れている。これについては 2005 年の ESA の論文 [1] にて同じような現象が報告されている。その様子を図 6.42 に示す。

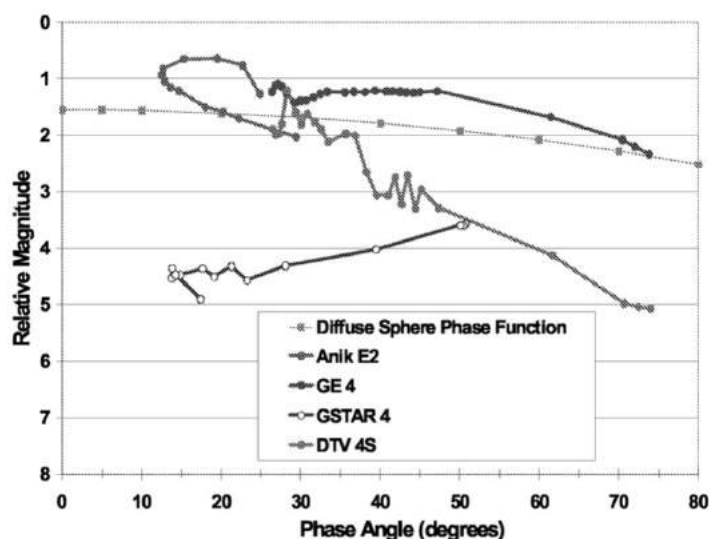


Figure 4. GEO payload phase angle curves.

図 6.42: 静止衛星の等級と phase angle の関係 (ESA 論文より)

ESA によるとこの現象は静止衛星が地心から見て太陽の真反対を通過する時に太陽光の当たる向きが、衛星の右からなのか、左からなのかが移り変わる事によって引き起こされると考えられている。本研究の観測は phase angle が微小となる時間に実施されている。そのためこのような現象が観測できたのだと考えられる。

## 6.7 等級の理論値と観測値の差の考察

### 6.7.1 等級理論値との比較

今回の観測結果が理論値とどのくらいの差があるのかの検証を行った。理論値は第三章で述べた lambert 反射の球のモデルを用いて計算を行った。但し、アルベドは 0.1, phase angle は  $25^\circ$ , 地心からの距離は今回観測された衛星の地心距離の平均値とした。アルベドの値は [2]

を参考にした．比較結果を表 6.16 に示す．

表 6.13: 実際の衛星のサイズと等級から計算した大きさの比較

衛星名	バス断面積	太陽電池断面積	合計断面積	乱反射球半径 (理論)	乱反射球断面積 (理論)
	m2	m2	m2	m	m2
BEIDOU G7	3.96	33.0	36.96	8.5	227
SUPERBIRD 7	11.1	81.9	93.00	5.0	78.5
CHINASAT 5A	-	-	-	2.8	24.6
WINDS	6.00	43.8	49.80	6.1	117
APSTAR 9	4.96	25.2	30.20	6.0	113
SKYMUSTER 2	-	-	-	5.3	88.2
MTSAT2	6.24	26.0	32.20	3.0	28.3

表を見ると、実際の大きさと球の大きさではあまり一致していない様子が分かる．これにはいくつか原因が考えられる．一つ目は現実の衛星の形状の複雑さである．実際の衛星はバス部分と太陽電池部分で構成されており、またバスと太陽電池パドルの間に隙間が空いているものも多い．しかし今回の用いている理論式ではこれを一様な反射率の球や板で近似しているので、ある程度大きさの不一致が現れてしまう．二つ目は等級値の変化によるものである．これは衛星の反射率や phase angle によって大きな影響を受ける．そこで次にこれらの等級への影響についての考察を行った．

## 6.7.2 等級と大きさ関係に関する考察

### 絶対等級による比較

等級と大きさの関係をより深く調査するために見かけの等級から絶対等級への変換を行った．変換手順はアメリカ空軍の論文 [26] の手順を参考にした．この論文では絶対等級を以下のように定義している．

$$m_{app} = \text{IntrinsicMagnitude} + \text{DistanceCorrection} + \text{OrientationCorrection} \quad (6.1)$$

$$\text{DistanceCorrection} = 2.5 \log_{10} \left[ \left( \frac{|\vec{r}_{Los}|}{36000 \text{ km}} \right)^2 \right] \quad (6.2)$$



$$OrientationCorrection = 2.5\log_{10} \left[ \sin(\eta_{phase}) + \left( \pi - \frac{\pi\eta_{phase}}{180} \right) \cos(\eta_{phase}) \right] \quad (6.3)$$

ここで Intrinsic Magnitude は絶対等級を表す.  $m_{app}$  は見かけの等級,  $\eta_{phase}$  は phase angle を表す.  $\vec{r}_{LOS}$  は第三章で述べたベクトルである. これは観測地と対称物体の間の距離の補正と phase angle の違いの補正を加えたものである. phase angle の補正は lambert 反射の球の理論値を用いて補正を行っている. 以下の変換例を示す. なお 1 週目, 2 週目, 3 週目, 4 週目, 5 週目の定義は見かけの等級の表と同じものである.

表 6.14: 各衛星の絶対等級

衛星名	試験観測	1 週目	2 週目	3 週目	4 週目	5 週目
BEIDOU G7	-	11.4	11.0	11.3	11.5	11.9
SUPERBIRD 7	-	11.2	11.1	12.0	11.9	12.1
CHINASAT 5A	-	12.6	12.6	12.6	12.5	12.4
WINDS	-	11.6	11.6	11.6	11.5	11.9
APSTAR 9	-	11.2	11.2	11.0	11.5	11.1
SKYMUSTER 2	11.4	-	-	-	-	-
MTSAT 2	12.6	-	-	-	-	-

表を見ると見かけの等級との差はそれほどないことが確認できる. これは各衛星と鹿島の距離, 各衛星の phase angle の差が微小であったためであると考えられる.

#### 等級と大きさの関係の矛盾に関する考察

一般に物体のサイズ (断面積) が大きければ大きい程等級の値は小さく, つまり明るくなる傾向がある. しかし今回の観測結果ではそのような傾向が見られなかった. さらに球の理論

値との比較においても、理論と一致していない様子が見られた。ただ衛星は上記のように、通常バス部分と太陽電池パネル部分で構成されているので、その二つの合計断面積が同じだったとしてもその二つの比率次第で明るさは変化すると考えることが出来る。そこで今回バスの大きさと太陽電池の大きさを考慮した重み付け数値による比較を行った。まず重みづけ合計値 1 としてバスと太陽電池それぞれについて、反射率と面積を乗じた値を足し合わせたものを計算した。ここでの反射率は [24] の値を参考とした。つまりバスの反射率が 0.2, 太陽電池の反射率が 0.05 である。次に、バスの反射率の違いを考慮した重みづけを行った。これは衛星のバスがサーマルブランケットに覆われているかどうかによって反射率の値も異なると考えられるためである。そこで今回各衛星の画像、写真を考慮し、BEIDOU G7, CHINASAT 5A, APSTAR 9 はサーマルブランケットに覆われていると判断した。その為これらの衛星のバスの反射率を 0.5 と仮定し、重み付け計算を行った。この計算結果を重みづけ合計値 2 とする。比較結果を表 6.15 に示す。

表 6.15: 各衛星の重みづけ合計値

衛星名	バス断面積	太陽電池断面積	合計断面積	等級	絶対等級	重みづけ合計値 1	重みづけ合計値 2
	m2	m2	m2				
BEIDOU G7	3.96	33.0	36.96	9.60	10.42	2.44	3.63
SUPERBIRD 7	11.1	81.9	93.00	10.8	11.61	6.32	6.32
CHINASAT 5A	-	-	-	12.0	12.82	-	-
WINDS	6.00	43.8	49.80	10.3	11.11	3.39	3.39
APSTAR 9	4.96	25.2	30.16	10.4	11.21	2.25	3.74
SKYMUSTER 2	-	-	-	10.6	11.40	-	-
MTSAT2	6.24	26.0	32.24	11.8	12.60	2.55	2.55

このように重み付け合計値の大きいものほど等級が小さくなる結果とはならなかった。この大きさと等級値の矛盾には主に 4 つの原因が考えられる。

まず一つ目は物体のサイズが大きいと等級差が出にくいことである。lambert 反射球の等級と大きさの関係についての理論値を見ると、等級は大きさに対して対数の関数で変化していくため、物体のサイズが大きければ大きい程、等級の差は小さくなっていく様子が確認できる。その為今回の対称物体の大きさではそもそも等級差が表れにくかったと推測される。

二つ目は WINDS の等級の観測値に見られた等級のループ現象である。今回の観測時間は phase angle が小さいところを狙ったため、地心-衛星-太陽の間の角度も微小であった。先に述べた ESA の報告のようにこのような状況では等級ループ現象がいつ起こってもおかしくない状況である。そのため各衛星の等級ループ現象の有無によっていくつかの衛星の等級値が大幅に変化してしまった可能性が考えられる。

三つ目は等級測定値の誤差である。今回の観測手法では画像によって背景に写る恒星が別の星となる。その為測光に用いる恒星もそれぞれ別の星を用いなければならなかった。恒星の等級値は USNO とティコ第二を見比べてみても、 $10^{-1}$  程度のオーダーで等級値が異なっていることがある。その為測光時に用いる恒星の違いによる等級値の差も今回の結果に影響を与えたと考えることが出来る。

四つ目は衛星の姿勢、アンテナの有無等の違いによるものである。今回の衛星サイズの計算では、アンテナの情報が入手不能であったためアンテナのサイズを考慮に入れていなかった。また静止衛星は一般的に地上の運用者の方にバス及びアンテナを向け、太陽電池パドルを太陽方向に向ける。今回の衛星は SKYMUSTER 2 以外全て中国、日本の衛星であるため姿勢の差の等級への寄与は少ないと考えていたが、実際にはその中国と日本の位置のわずかな差が等級値に影響を及ぼした可能性も考えることが出来る。その為今後このような等級変化原因について、どの原因がどの程度等級に変化を与えるのかをより深く調査する必要がある。

### 6.7.3 WINDS の等級に関する考察

WINDS に関しては寸法などの詳細情報が入手可能であったため、より正確な等級モデルを構築を試みた。具体的には oceanit 社の論文 [24] にて示されているモデリング手法を参考にして新たなモデルを考えた。この論文では静止衛星のバス部分と太陽電池パネル部分など各パーツからの反射フラックスの値を計算することで、phase angle が大きい時の静止衛星特有の等級変化をモデリングしている。そこで本研究では今回の観測範囲、つまり微小 phase angle において各パーツからのフラックスを考え理論的な等級値の計算を試みた。設定パラメータを表 6.16 に示す。尚、パラメータの値は oceanit 社 [24] の論文で用いられている値を

参考にし決定した．WINDS の各パーツの大きさは 2008 年の宇宙科学技術連合講演会の予稿集に載っていた WINDS の寸法から数値を引用した．

表 6.16: 設定パラメータ (oceanit 社 [24] を参考)

パラメータ	記号の意味	値
$a_E$	地球のアルベド	0.30
$a_{front}$	太陽電池パドル表面のアルベド	0.05
$a_{bus}$	バスのアルベド	0.20
A	パネルの大きさ	$28.06 \text{ m}^2$
$R_E$	地球半径	6371 km
$r_{bus}$	衛星バスの半径	1.38m( $6\text{m}^2$ となる半径)
R	観測地と衛星の距離	35851477km

まずバス部分の反射フラックスについて考える．バスは太陽光の反射フラックスと地球で反射した太陽光による反射フラックスの二つが存在する．バスを球として考えると太陽光の反射フラックスは [24] によると以下のように記述することが出来る．

$$F_{bus,solor}(a_{bus}, r_{sat}, \phi) = \frac{2}{3} \cdot a_{bus} \cdot \frac{r_{sat}^2}{\pi R^2} \cdot (\sin(\phi) + (\pi - \phi)\cos(\phi)). \quad (6.4)$$

地球からの反射光によるフラックスは [24] より

$$F_{bus,E}(a_{bus}, r_{sat}, 0) = \frac{2}{3} \cdot a_{bus} \cdot \frac{r_{sat}^2}{\pi R^2} \cdot F_E. \quad (6.5)$$

となる．ただし,

$$F_E(a_E, R_E, \phi_E) = \frac{2}{3} \cdot a_E \cdot \frac{R_E^2}{\pi R^2} \cdot (\sin(\phi_E) + (\pi - \phi_E)\cos(\phi_E)). \quad (6.6)$$

$$\phi_E = \pi - \phi \quad (6.7)$$

次に太陽電池パドルについて考える．静止衛星の太陽電池パドルは一般に, 太陽光が常に正面に当たるように制御されている．その為反射フラックスは以下のように記述することが

出来る. ([24] より)

$$F_{front}(a_{front}, A, 0) = a_{front} \cdot \frac{A}{\pi R^2} \cdot \cos(\phi). \quad (6.8)$$

さらに本研究ではバスと太陽電池パドルだけではなくアンテナによる反射フラックスを考慮に入れた. WINDS には二つのパラボラアンテナが付属しているのでこれらの反射フラックスの計算を試みた. 具体的にはアンテナのモデルに [2] の plate の反射モデルを採用した. これはアンテナを太陽追尾しない 2 枚の板として近似したことになる. その結果アンテナの反射フラックスは以下のように記述することが出来る. 尚アンテナのアルベド  $a_{antenna}$  は 0.2, アンテナの断面積  $A_{antenna}$  は  $4.52 \text{ m}^2$  (直径 2.4m の球板と同じ面積) とした.

$$F_{front}(a_{antenna}, A_{antenna}, \phi) = a_{antenna} \cdot \frac{A_{antenna}}{\pi R^2} \cdot \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right). \quad (6.9)$$

これらの計算値を全て足し合わせることで全反射フラックス及び等級を計算することが出来る. それぞれのフラックスの計算結果を図 6.43 にて示す. なお Bus\_Flux はバスで反射した太陽光のフラックス, Bus\_Earth\_Flux は地球で反射した太陽光がバスで反射した時のフラックス, Panel\_Flux が太陽電池の反射フラックス, antenna\_Flux がアンテナの反射フラックス, Sum\_Flux が合計フラックスである.

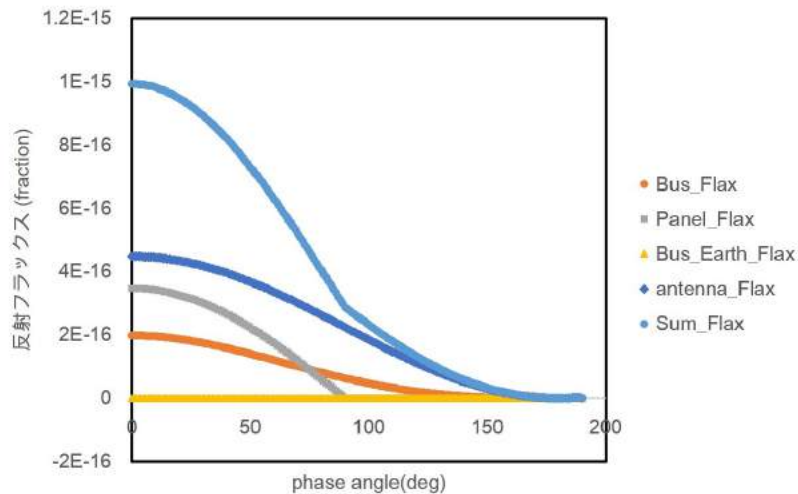


図 6.43: 各フラックス計算値

以上の計算値を用いて見掛けの等級を以下の式より算出した.

$$m_V(\phi) = -26.74 - 2.5 \cdot \log(F(\phi)) \quad (6.10)$$

ここで-26.74 は太陽の見かけの等級であり,  $F(\phi)$  は上記の各パーツでのフラックスの式である. 最後に lambert 反射の球と板のモデルと今回提案したモデル, [24] の simple photometric model, 観測データの比較を行った. 比較を図 6.45 に示す. なおそれぞれの理論の形状モデルは図 6.44 の通りである.

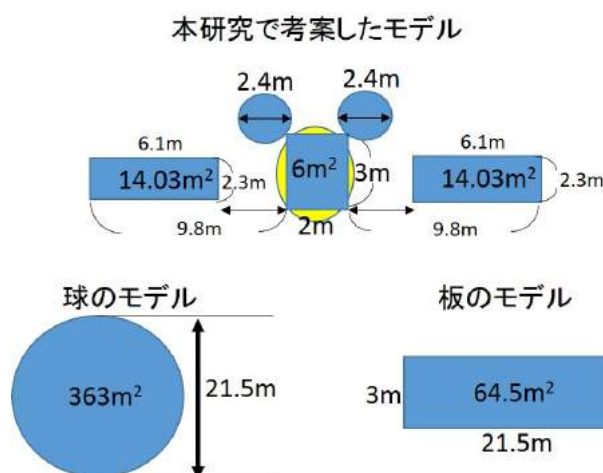


図 6.44: 今回用いた各モデルの形状

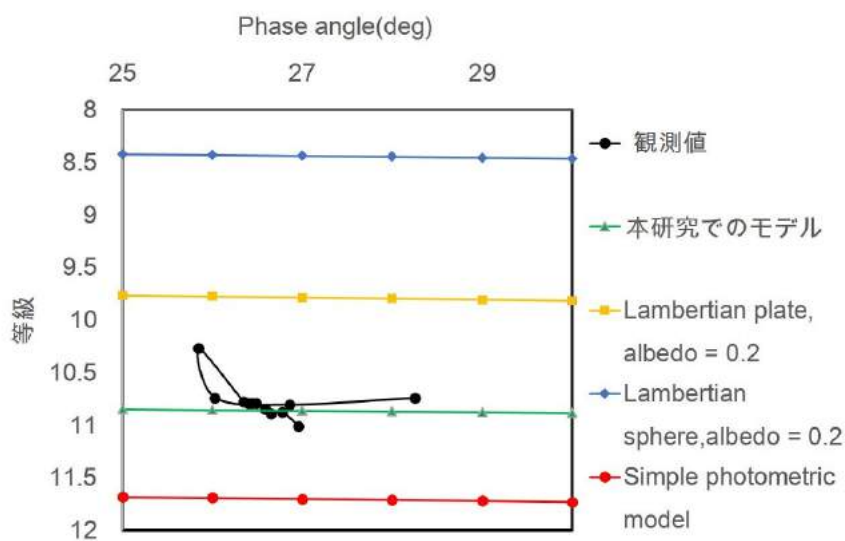


図 6.45: WINDS 等級理論値と観測値の比較

このように今回のモデルが一番観測値に近い結果となったことが確認できた。しかし等級変化のループ現象の再現には至らなかった。この等級のループ現象を再現するにはバスを球ではなく箱として考え、さらに太陽光の向きを考慮する必要があると考えられる。

## 6.8 unknown 物体について

F21 に写っていた object2 については現時点で JSpOC の軌道情報カタログに該当するものが見つからなかった。そこで像の形から物体のより詳細な情報の解明を試みた。

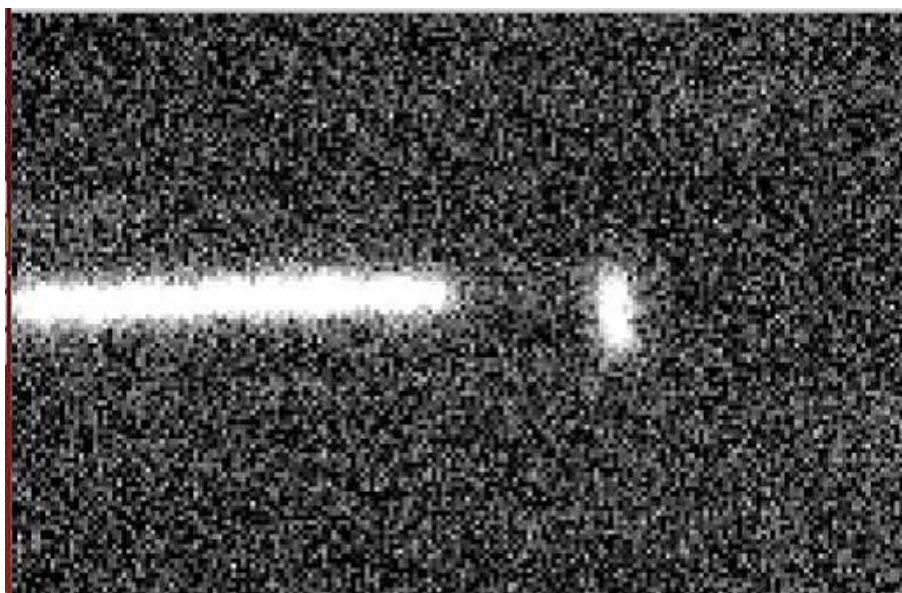


図 6.46: unknown 物体の像

まずこの像の特徴としては点像ではなく、南北に伸びている点が上げられる。像が南北に伸びる理由としては物体自体が移動しているか、物体自体の形が縦長であるかが考えられる。しかしこの画像は CCD の露出時間を 10 秒に設定し撮像したものなので、もし口径 35cm 望遠鏡で物体の形を見分けることが出来る高度に存在する衛星ならば、この画像のように静止することはありえない。そこでこの像の伸びを移動によるものだと考え移動角度から物体の高度の推定を行った。ただしここでは unknown 物体の軌道を円軌道と仮定する。まず像の下端から上端までのピクセル数を ds9 を用いて調べた。その結果およそ 27 ピクセルである

ことが分かった。これは角度に換算すると、およそ 0.009 度である。次にこの移動角度から公転周期の算出を行った。10 秒間で 0.009 度なので 1 時間で 3.24 度、1 日で 77.76 度動くこととなる。1 日で 77.76 度とは 1 日で 0.216 周することになるので、公転周期は 6666.67 分となる。最後に公転周期から高度の計算を行った。高度はケプラーの第三法則により計算することが出来る。その結果高度はおよそ 165471.92km であることが分かった。この高度は静止軌道よりもはるかに遠い軌道となるため存在する衛星は少ない。しかしこの物体が小惑星であるならば移動速度はさらに遅くなるはずである。そこで N2YO.com(<http://www.n2yo.com/>) という軌道情報サイトにて軌道情報を調査したところ、過去に同様の軌道に軍事衛星が存在していたことが分かった。unknown 物体の明るさは 13 等程度であったので lambert 反射の球モデルから大きさを計算するとおよそ半径 5.7m の球程度の大きさであるという結果となる。以上のことを考慮に入れると、この物体の正体は何らかの軍事衛星である可能性が高いと予想される。なおこの物体は静止軌道よりもはるかに遠くに存在するので、現時点では ETS-9 の障害にはなりえないと考えられる。



## 第7章 まとめ

現在, 人工衛星の数は益々増え続け, 人工衛星・スペースデブリ (宇宙ゴミ) による宇宙空間の混雑問題が深刻になっている. 世界各国の宇宙機関がスペースデブリ除去技術についての研究を進めているがいずれも実用レベルには程遠い状態であるため, どの軌道にどのようなスペースデブリが存在するのかを正確に把握し, 人工衛星を運用することが衝突事故を防ぐために非常に重要となる. そのような中 NICT(情報通信研究機構) が開発している高速光通信装置 “HICALLI” と電波による通信装置を搭載した次期技術試験衛星 (ETS-9) が 2021 年に打ち上げられ, 静止軌道上に投入される予定である. 衛星を安全に運用するためには周辺他衛星やスペースデブリの状況を把握する必要がある. しかし衛星運用者が手に入れることのできる JSpOC の軌道情報カタログは全ての人工衛星、スペースデブリを網羅しているわけではない. そのような背景から本研究では ETS-9 投入予定軌道周辺を光学観測し, 周辺状況の調査を行った. また静止物体の光学特性に関する研究例は世界的に見ても少ないため, 等級による解析を実施し, 将来スペースデブリや未知物体の解析に役立つようなデータの取得を目指した.

観測は 2017 年 1 月に NICT 鹿島宇宙技術センターにて口径 35cm 望遠鏡を用いた光学観測を実施した. ETS-9 投入予定位置, 現在 WINDS がいる位置を中心に 9 つの視野をそれぞれ複数回撮像して実施した. 撮像は望遠鏡の恒星追尾機能をオフにする手法で, CCD カメラの露出時間を 1 秒から 50 秒として撮像を行った. この手法では静止軌道上の物体は点像に, 恒星は CCD の露出時間の分だけ伸びた線像となる. そして本研究では観測画像に天文学の世界で用いられる 1 次処理と呼ばれる画像処理を施した. この処理の結果バックグラウンドのノイズレベルが半減し, 試験観測画像及び, 10s 露出と 20 秒露出の撮像画像から合計 8 個の物体を確認することが出来た. そして以下のような解析を実行した.

- シーイングの測定

まず初めにこれらの物体のシーイング (像の広がり具合) を測定した。その結果シーイングは露出時間 10s で最小値が 5.82arcsec となっていることが確認でき、観測日時当時は全体的にシーイングが比較的悪い値であったことが分かった。

- 物体の同定

次にこれらの物体の同定作業を行った。同定は観測日前日の全衛星、デブリの TLE データから観測時においての鹿島から見た全衛星、デブリの位置を計算するプログラムを作成し、観測された物体の位置との比較によって行った。観測された物体の位置は背景に写っている恒星との相対位置から計算した。その結果今回観測された物体は試験観測では日本の衛星 MTSAT 2, オーストラリアの衛星 SKYMUSTER 2, 本観測では、東から中国の衛星 BEIDOU G7, unknown 物体, 日本の衛星 SUPERBIRD 7, 中国の衛星 CHINASAT 5A, 日本の衛星 WINDS, 中国の衛星 APSTAR 9 であることが分かった。これはアメリカ軍の持っている人工物体分布データと同等レベルのデータを本研究にて取得できたことを示しているともいえる。

- 物体位置の変化の測定

さらに画像の重ね合わせによる物体の位置の時間変化を測定した。その結果 SUPERBIRD 7, APSTAR 9 は直角に曲がる運動をしており、それ以外の衛星は一様に南北方向に移動している様子が確認できた。そこで WINDS の移動距離について NICT 鹿島宇宙技術センターの浅井敏男氏の提供情報、及び JAXA 軌道情報サイトのデータと見比べてみた所、これは静止衛星がわずかに軌道傾斜角を持った時に起こる 8 の字運動の一部分であることが分かった。そして他の衛星についても軌道傾斜角を確認したところ SUPERBIRD 7, APSTAR 9 については 0.1 度以下に抑えられており、それ以外の衛星は 0.1 度以上の値となっていた。このことから SUPERBIRD 7, APSTAR 9 の動きは軌道制御の動きであり、それ以外の衛星の動きは 8 の字運動であることが分かった。そのため次期技術試験衛星投入の際には、制御のされていなかった BEIDOU G7,

CHINASAT 5A の位置に注意する必要がある。

- 等級の解析

そして点像の測光による解析を行った。点像のカウント値と等級が既知の恒星のカウント値を比較することで点像の等級を計算した。そして各観測時刻の phase angle を計算し、等級との関係性を調べた。その結果 CHINASAT 5A 以外については phase angle が大きくなるにつれて等級の値が大きくなっている様子が確認できた。また WINDS に関しては phase angle に対する等級の変化の特徴的なループ現象が確認された。これは ESA の 2005 年の論文で報告されている現象で、太陽、地球、衛星が一直線上に並ぶときに、衛星に当たる太陽光の向きが切り替わることで起こるものであったと考えられる。また一般に衛星の大きさが大きければ等級値も小さくなるが今回の観測結果はそのようになっていなかった。この関係を考察するために見かけの等級から絶対等級への変換を行った。本研究ではアメリカ空軍の絶対等級の定義を用いた。これは各衛星の観測地からの距離と phase angle の違いを規格化するものである。変換結果を見比べてみると、見かけの等級とあまり変わらないことが分かった。これは観測地からの距離、phase angle がどの衛星も同じような値であったためである。次に反射率の影響を考慮するために重みづけ合計値による比較を行った。これは衛星の断面積をバスと太陽電池パドル部分に分けて考え、それぞれに反射率の値を乗じて足し合わせた合計値を用いて比較を行うものである。反射率は oceanic 社の論文にある値を用いた。また衛星毎のバスの反射率の違いを考慮し、重みづけした合計値での比較も行った。その結果、いずれの重みづけ合計値も等級と大きさの関係に相関がみられなかった。この原因としては、物体のサイズが大きいと等級差が出にくいこと、WINDS の等級の観測値に見られたような等級のループ現象、等級測定値の誤差、衛星の姿勢、アンテナの有無等の違いなどが考えられる。その為今後このような等級変化原因について、どの原因がどの程度等級に変化を与えるのかを調査する必要がある。

- 限界等級の計算

限界等級の計算を行った。限界等級は天体の測光値 (Signal) が雑音 (Noise) の何倍かと

いう比  $S/N$  によって決められる。本研究ではスペースガードセンターの先行研究に習い、 $S/N=5$  を限界等級として定義した。ポグソンの式を用いて計算してみると限界等級はおよそ 16 等であることが分かった。これは大きさにすると、球で半径 0.45 メートル程度、板で  $0.4m^2$  程度の大きさに相当する。つまり本研究の観測ではこれ以上のサイズの物体は全て検出できているということを意味すると共に、今回観測した領域にはこのサイズ以上の物体は存在しないことが分かった。

- WINDS の等級モデルの考察

WINDS の等級についてより詳細なモデルを考えた。これは oceanic 社の論文のモデルを参考に衛星で反射される太陽光をバス部分、太陽電池部分のフラックスとして具体的にモデリングすることで等級値を計算するものである。本研究ではさらに WINDS のアンテナのフラックスを考慮することでより現実的なモデルを考えた、その結果球や板のモデルに比べ、本研究でのモデルが一番観測値に近い値となった。

- unknown 物体についての解析

最後に unknown 物体についての解析を行った。この像の特徴としては点像ではなく、南北に伸びている点が上げられる。そこで本研究ではこの像の伸びを移動によるものだと考え、移動距離から周期を計算し、ケプラーの第三法則を用いて高度の推定を行った。その結果この unknown 物体の高度はおよそ 165471.92km であることが分かった。この軌道にはかつてアメリカの軍事衛星が存在していたことが確認されている。また unknown 物体の明るさは 13 等程度であったので lambert 反射の球モデルから大きさを計算するとおよそ半径 5.7m の球程度の大きさであるという結果となった。その為この unknown 物体も何らかの軍事衛星であることが推定される。なお静止軌道よりもはるかに遠くに存在するので、現時点では ETS-9 の障害にはなりえないと考えられる。

- 今後の課題

今回の観測ではサイズの大きいデブリは確認できなかった。しかし一般にデブリなどの拡散した破片は大きいものほどその数が少ないといわれているため、本研究の観測結

果は理にかなった結果となっている。本研究の観測では静止デブリは発見されなかったが、先に示したとおり、観測限界よりも小さいサイズの静止デブリは今回の観測領域に存在している可能性がある。その為今後の課題としてはその様なデブリを観測するためにより口径の大きい望遠鏡で本研究と同様の観測を実施する必要がある。また WINDS の等級モデルの考察では既存の研究よりも精度よくモデリングすることが出来た。しかし phase angle に対する等級のループ上の変化は再現できていない。この変化は太陽光の当たる向きの変化によるものなので、そのような物理現象及び、衛星本体の光学特性をより詳しくモデリングすることが今後の課題となる。加えて反射率や姿勢による等級値への影響をさらに詳細に分析することで未知のスペースデブリの正体の解析などに応用することができると考えられる。

## 参考文献

- [1] Africano, J., Kervin, P., Hall, Doyle., Sydney, P., Ross, J., Payne, T., Gregory, S., Jorgensen, K., Jarvis, Kandy, Parr-Thumm, T., Stansbery, G., and Barker, Edwin, "Understanding photometric phase angle corrections". *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, 587. 141., 2005
- [2] Africano, J.L, Stansbery, E.G and Kervin, P.W, "The optical orbital debris measurement program at NASA and AMOS", *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 5, pp 892-900, 2004
- [3] Carolin Frh and Thomas Schildknecht, "Accuracy of Two-Line-Element data for Geostationary and high-eccentricity orbits", *ournal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 35, No. 5 : pp. 1483-1491, 2012
- [4] David Vallado, Paul Crawford, Ricahrd Hujsak, and T.S. Kelso. "Revisiting spacetrack report #3", *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*, 2006
- [5] Douglas Streuber W., Elliot Bailis I., "Imaging charge-coupled devices for deep-space surveillance", *Proc. SPIE 0252, Smart Sensors II*, 1980
- [6] E. M. Soo, "HANDBOOK OF GEOSTATIONARY ORBITS", Microcosm, 1994
- [7] Gary McCue, A., James Williams, G. and Joan Morford, M., "Optical characteristics of artificial satellites", *Planetary and Space Science*, Volume 19, Issue 8, pp 851-868, 1971

- [8] Giese, R. H., "Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites", *SAO Special Report #127*, 1963
- [9] Hoots, Felix R., Ronald L. Roehrich, and T. S. Kelso., "Spacetrack report no. 3." *Project Spacetrack Reports*, Office of Astrodynamics, Aerospace Defense Center, ADC/DO6, Peterson AFB, CO 80914, 1980
- [10] Johnson, N. L., Stansbery, E., Whitlock, D. O., Abercromby, K. J., and Shoots, D., "History of on-orbit satellite fragmentations", 2008
- [11] Jolley, A., "Analysis of specular reflections off geostationary satellites", *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, pp.89-99, 2016
- [12] Kervin, P.W., Africano, J.L., Sydney, P.F. and Hall, Doyle, "Small satellite characterization technologies applied to orbital debris". *Advances in Space Research*. 35. 1214-1225, 2005
- [13] Kessler, D.J and S.Jarvis, K., "Obtaining the properly weighted average albedo of orbital debris from optical and radar data", *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 5, pp 1006-1012, 2004
- [14] Krag, William E., "Visible magnitude of typical satellites in synchronous orbits" *NASA STI/Recon Technical Report N*, Vol. 75, p. 12024, 1974
- [15] Krisciunas, K. and Schaefer, B. E., "A model of the brightness of moonlight", *Astronomical Society of the Pacific*, Publications (ISSN 0004-6280), vol. 103, pp. 1033-1039, 1991
- [16] Lamboura, R., Rajana, N., Morgana, T., Kupieca, I. and Stansbery, E., "Assessment of orbital debris size estimation from radar cross-section measurements", *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 5, 2004, Pages 1013-1020, 2003

- [17] Liemohn, H.B., "Optical tracking of deep-space probes", *Icarus*, Volume 9, Issues 13, pp 217-220, 1968
- [18] NASA, The orbital debris quarterly news, Volume 20, Issue 1 and 2, 2016
- [19] NASA, The orbital debris quarterly news, Volume 6, Issue 3, 2011
- [20] National Research Council, "*ORBITAL DEBRIS*", National Academy Press, 1995
- [21] Park, Sun-youp, Choi, Jin, Jo, Jung Hyun, Son, Ju Young, Park, Yung-Sik, Yim, Hong-Suh, Moon, Hong-Kyu, Bae, Young-Ho, Choi, Young-Jun and Park, Jang-Hyun, "Development of a reduction algorithm of GEO satellite optical observation data for optical wide field patrol (OWL)", *Journal of Astronomy and Space Science*, Vol. 32, pp. 201-207, 2015
- [22] Rajan, N., Morgan, T., Lambour, R. and Kupiec, I., "Orital debris size estimation from radar cross section measurements", *Proceedings of the Third European Conference on Space Debris*, pp.83-88, 2001
- [23] Rita L. Cognion, "Large phase angle observations of GEO satellites", *Sensors and Systems for Space Applications VI*, Proc. SPIE 8739, 2013
- [24] Rita L. Cognion, "Observations and modeling of GEO satellites at large phase angles", *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, E64, 2013
- [25] Roh, Dong-Goo, Choi, Jin, Jo, Jung Hyun, Yim, Hong-Suh, Park, Sun-Youp, Park, Maru, Choi, Young-Jun, Bae, Young-Ho, Park, Young-Sik, Jang, Hyun-Jung, Cho, Sungki, Kim, Ji-Hye and Park, Jang-Hyun, "magnitude standardization procedure for OWL-Net optical observations of LEO satellites", *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 32, No. 4, pp. 349-355, 2015



- [26] Schmunk Matthew, M., "Initial determination of low earth orbits using commercial telescopes", 90, 2008
- [27] Seitzer, P., Lederer, S., Barker, E., Cowardin, H., Abercromby, K., Silha, J., Burkhardt, A., "A search for optically faint GEO debris", *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, pp E22, 2011
- [28] Seo, Haingja, Song, Yongjun, Lee, Yongseok and Oh, Youngseok, "The photometric brightness variation of geostationary orbit satellite", *Journal of the Korea Space Science Society*, Vol. 30, pp. 179-185, 2013
- [29] Shell, J., "Optimizing orbital debris monitoring with optical telescopes", *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, he Maui Economic Development Board., id.E42, 2010
- [30] Silha, J., Schildknecht, T., Hinze, A., Flohrer, T. and Vanantia, A., "An optical survey for space debris on highly eccentric and inclined MEO orbits", *Advances in Space Research*, Volume 59, Issue 1, pp.181-192, 2017
- [31] Talent, D., Potter, A. and Henize, K., "A search for debris in GEO" *Second European Conference on Space Debris, Organised by ESA*, pp.99-104, 1997
- [32] Tim Flohrer, Holger Krag and Heiner Klinkrad, "Assessment and Categorization of TLE Orbit Errors for the US SSN Catalogue" *Space Surveillance Technologies Conference*, p.E53, 2008
- [33] Tower, J.R., Swain, P.K., Hsueh, Fu-Lung, Dawson, R.M., Levine, Peter, eray, G.M., Andrews, J.T., Frantz, V.L., Grygon, Mark, Reale, M.A., and Sudol, Thomas, "Large format backside illuminated CCD imager for space surveillance. Electron Devices", *IEEE Transactions on*. 50., pp218 - 224, 2003

- [34] Williams, J.G. and McCue, G.A., "An analysis of satellite optical characteristics data", *Planetary and Space Science*, Volume 14, Issue 9, pp 839-847, 1966
- [35] 岩崎信夫, 的川泰宣, "図説宇宙工学", 日経印刷, 2010
- [36] 梅原広明, 木村和宏, "静止デブリの光学観測: 赤経 90 [deg] 方向の探索", 日本航空宇宙学会論文集, 49, 564, 1-8, 2001
- [37] 奥村真一郎, "美星スペースガードセンターにおけるデブリ光学観測活動", *JAXA Special Publication: Proceedings of the 7th Space Debris Workshop*, JAXA-SP-16-011, pp437-456, 2017
- [38] 加藤明, "スペースデブリ: 宇宙活動の持続的発展をめざして", 地人書館, 2015
- [39] 川瀬誠一郎, "人工衛星の軌道概論", コロナ社, 2015
- [40] 更田博昭, 近藤健, "実践静止衛星設計入門", ジャテック出版, 1987
- [41] 高橋正昭, 梅原広明, 川瀬成一郎, "静止衛星の光学観測 4", 信学技法 *SANE2003*, pp111, 2003
- [42] 冨田信之, "宇宙システム入門", 東京大学出版, 1993
- [43] 長沢工, "天体の位置計算増補版第 5 刷", 地人書館, 2001
- [44] 長山翔太, "可搬型望遠鏡を用いた低軌道衛星の位置観測システムの研究開発", 電気通信大学大学院情報システム学研究科修士論文 (未公刊), 2017
- [45] 花田俊也, "静止および静止投棄軌道上物体の単調増加の結果", 日本航空宇宙学会論文集, 50 巻, 577 号, 2002
- [46] 半揚稔雄, "ミッション解析と起動設計の基礎", 現代数学社, 2014

- [47] 布施哲治, 黒田大介, 久保岡俊宏, ”静止衛星観測用光学望遠鏡の現状と改修プラン”,  
*JAXA special publication: Proceedings of the 4th Space Debris Workshop*, JAXA-SP-10-011, pp117-125, 2011
- [48] 布施哲治, ”鹿島 35cm 望遠鏡を用いた人工衛星の観測”, *JAXA Special Publication: Proceedings of the 5th Space Debris Workshop*, JAXA-SP-13-018, pp371-388, 2014
- [49] 福島英雄, ”天文アマチュアのための冷却 CCD 入門”, 誠文堂新光社, 1996
- [50] 柳沢俊史, ”微小スペースデブリ検出のための地上観測技術”, 光学 40.7, pp337-343. 2011

# 発表業績

- 研究談話会 - NICT
  - ・ 第 46 回宇宙通信研究室研究談話会  
“ETS-IX 投入予定軌道周辺における他衛星・デブリの空間分布に関する研究”  
高橋藍 (電通大), 布施 哲治 (電通大 NICT), 久保岡 俊宏 (NICT)
- 国内学会
  - ・ 第 61 回宇宙科学技術連合講演会 「次期技術試験衛星で目指す電波/光による超高速衛星通信」  
“ETS -投入予定軌道周辺における他衛星・デブリの空間分布に関する研究”  
高橋藍 (電通大), 布施 哲治 (電通大 NICT), 久保岡 俊宏 (NICT)
- 国際学会
  - ・ IEEE ICSOS 2017 「Poster Session」  
“Optical Survey Observations for satellites and Debris around Planned Geostationary Orbit of Next Generation Engineering Satellite “  
Aoi Takahashi(NICT), Tetsuharu Fuse(UEC/NICT), Toshihiro Kubo-oka(NICT)

# 謝辞

本研究を進めるにあたり, 主任指導教官として日頃, 熱心かつ丁寧な指導を賜りました情報理工学研究科の布施哲治客員准教授に心より感謝申し上げます。 また指導教官としてご指導頂いた情報理工学研究科の末廣尚士教授, また著者の所属する知能システム学講座の工藤俊亮准教授にも感謝致します。

また国立研究開発法人情報通信機構宇宙通信研究室の久保岡俊宏様には実際の観測から学会発表の準備までお世話になり, 大変感謝しております。 並びにスペースデブリ観測についてアドバイス頂いた國森裕生様, 参考文献のアドバイスを頂いた竹中秀樹様, 国際学会の準備でお世話になった Alberto Carrasco-Casado 様, 及び宇宙通信研究室の皆様に心より感謝致します。

また著者の研究に必要な情報を提供して頂いた, 同機構鹿島宇宙技術センターの浅井敏男様に感謝致します。